

UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**ESTUDIO FISICOQUÍMICO EN TUBERIAS DE HORMIGÓN EN AGUA CON
pH ALCALINO ELEVADO**

TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO

AUTORES:

LUIS ALBERTO LEON CONDO

C.I.: 0105811996

JORGE LUIS CAMPOVERDE TENESACA

C.I.: 0105184873

DIRECTOR:

LIC. CHRISTIAN AMÉRICO CRUZAT CONTRERAS

C.I.: 0107985681

CUENCA-ECUADOR

2017

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue estudiar el comportamiento de los tubos de hormigón expuestos al agua residual con pH alcalino. Para este propósito, muestras de 0,04 x 0,04 m de sección rectangular y 0,6 m de longitud, fueron extraídas de los tubos de hormigón, provistos por "Prefabricados del Austro". Estas muestras se sometieron a formulaciones acuosas de pH 9, 10 y 13. La prueba fue a lo largo de 90 días y se determinó la resistencia a la flexión, las cantidades de cloruros y sulfatos, la progresión de la carbonatación y la porosidad de las tuberías.

El análisis para las pruebas físicas se realizó en el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ingeniería y para los análisis químicos, los ensayos se realizaron en el laboratorio de Bromatología e Ingeniería de Reactores y Catálisis de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad de Cuenca.

Las muestras expuestas a pH 9, 10 y 13 mostraron valores de 0,360 a 1,021% de sulfatos y 0,0214 a 0,061% de cloruros, respectivamente. El porcentaje más elevado de sulfatos como de cloruros, se encontró a los 90 días y pH 13.

Por otro lado, los resultados muestran una reducción drástica del valor de la resistencia a la flexión para las muestras a pH 13. Estos valores estuvieron entre 11,029 MPa y 8,078 MPa a los 90 días de exposición. Además, la porosidad de la muestra obtenida en base a la isoterma de adsorción-desorción, se sometió a una prueba de coherencia, antes de determinar el área superficial mediante el método BET. El sólido analizado tiene un área superficial de 20,89 m² /g y esto se asoció con la presencia de macroporos en las muestras.

Palabras Claves: Cemento, porosidad, ensayo de cloruros, ensayo de sulfatos, tuberías de hormigón.

ABSTRACT

The aim of this work was to study of concrete pipes behavior exposed to residual water with alkaline pH. For this purpose, samples of 0,04 x 0,04 m of rectangular section and 0,6 m of length, it was extracted to concrete pipes provided by "Prefabricados del Austro". this samples were submitted to pH 9, 10 and 13 aqueous formulations. Test was along of 90 days and carrier out measurements of bend strength, chlorides and sulfates quantities, carbonation progression and porosity of the pipes.

The analysis for the physical tests was carried out in the Soil Laboratory of the Faculty of Engineering and for the chemical analyzes, the tests were carried out in the Laboratory of Bromatology and Reactors Engineering and Catalysis of the Faculty of Chemical Sciences of the University of Cuenca.

Samples exposed to pH 9, 10 and 13 was shown values from 0,360 to 1,021% of sulfates, and 0,0214 to 0,061% to chlorides, respectively. The highest sulfates percentage, such as chlorides was found at 90 days and pH 13

On the other hand, the results show a reduce drastically the value of bend strength for samples at pH 13. these values were between 11,029 MPa and 8,078 MPa at 90 days of exposure. Furthermore, the porosity of the sample obtained in base to adsorption-desorption isotherm were submitted to a coherence test, before to determine the surface area by means of the method BET. The analyzed solid has a surface area of 20,89 m²/g and this was associated with the presence of macropores in the samples.

KEYWORDS: Cement, porosity, chloride test, sulfate test, concrete pipes.

ÍNDICE.

RESUMEN	2
ABSTRACT.....	3
LISTA DE TABLAS	6
LISTA DE GRÁFICAS.....	10
LISTA DE ILUSTRACIONES.....	10
CLÁUSULA DE DERECHOS DEL AUTOR.....	12
CLÁUSULA DE DERECHOS DEL AUTOR.....	13
CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL	14
CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL	15
1. INTRODUCCIÓN.	20
1.1 RESEÑA HISTÓRICA.....	20
1.2 PRINCIPALES MATERIALES QUE SE UTILIZA EN LA FABRICACIÓN DE TUBOS.	21
1.2.1 CEMENTO.....	21
1.2.2 LOS ÁRIDOS O AGREGADOS.....	21
1.2.3 AGUA.....	22
1.2.4 ADITIVOS.....	22
1.3 CLIENTES.	22
1.4 TUBOS DE HORMIGÓN.....	23
1.4.1 TUBERIAS DE HORMIGÓN EN MASA.....	23
1.4.2 TUBERIAS DE HORMIGÓN ARMADO.	23
1.5 PROCESO DE FABRICACIÓN DE TUBOS DE HORMIGÓN.	24
1.5.1 ALMACENAMIENTO DE MATERIA PRIMA.....	24
1.5.2 DOSIFICACIÓN.....	25
1.5.3 MEZCLADO.....	25
1.5.4 MOLDEADO Y DESMOLDADO.	26
1.5.5 FRAGUADO DE LAS TUBERÍAS DE HORMIGÓN.....	30
1.5.5.1 FRAGUADO CERRADO.....	30
1.5.5.2 FRAGUADO AL AMBIENTE.	31
1.6 MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS TUBOS DE HORMIGÓN.....	31
1.6.1 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN.....	31
1.6.2 RESISTENCIA HIDROSTÁTICA.	34
1.6.3 ABSORCIÓN.	34
1.6.4 ALCALINIDAD.	34

1.6.5 REQUISITOS GENERALES DEL ACABADO.	35
1.7 <i>pH EN LAS TUBERIAS DE HORMIGÓN.</i>	35
1.8 <i>TRANSPORTE DE LOS MEDIOS AGRESIVOS EN EL INTERIOR DE LAS TUBERIAS.</i>	35
1.9 <i>DETERIORO DE LAS TUBERIAS DE HORMIGÓN.</i>	35
1.10 <i>FENÓMENOS QUE AFECTAN LA DURABILIDAD TUBERIAS DE HORMIGÓN.</i>	36
1.10.1 CICLOS DE HIELO/DESHIELO.	36
1.10.2 ATAQUE POR ÁCIDOS.	37
1.10.3 ATAQUE POR CLORUROS.....	38
1.10.3.1 MECANISMOS DE PENETRACIÓN DE CLORUROS.	39
1.10.3.2 MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE CLORUROS EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN.	39
1.10.3.3 DETERMINACIÓN DE CLORUROS POR ESPECTROSCOPIA.	40
1.10.4 ATAQUE POR SULFATOS.....	41
1.10.4.1 DETERMINACIÓN DE SULFATOS POR ESPECTROFOTOMETRÍA.	42
1.10.4.2 INTERFERENCIAS QUE SE PRESENTAN EN LA DETERMINACION LOS SULFATOS.	43
1.10.5 CARBONATACIÓN 43	
1.10.5.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE CARBONATACIÓN.....	45
1.10.5.2 DETERMINACIÓN DE LA CARBONATACIÓN.	46
1.11 <i>INFLUENCIA DE LA HUMEDAD Y TEMPERATURA SOBRE LOS PROCESOS DE DETERIORO DE LAS TUBERIAS DE HORMIGÓN.</i>	47
1.12 <i>DURABILIDAD DEL HORMIGÓN.</i>	47
2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	49
2.1 <i>OBJETIVO GENERAL.</i>	49
2.2 <i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS.</i>	49
3. PARTE EXPERIMENTAL.....	50
3.1 <i>MATERIALES.</i>	50
3.2 <i>EQUIPOS.</i>	50
3.3 <i>METODOLOGIA.</i>	50
3.3.1 OBTENCIÓN DE LAS PROBETAS RECTANGULARES DE LOS TUBOS DE HORMIGÓN.	50
3.3.2 PREPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES CON pH ALCALINO ELEVADO.....	52
3.3.3 INMERSIÓN DE LAS PROBETAS DE LAS TUBERIAS DE HORMIGÓN EN LAS SOLUCIONES ALCALINAS.....	53

3.3.4 EVALUACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LAS PROBETAS DE TUBERÍAS DE HORMIGÓN.	53
3.3.4.1 EVALUACIÓN FÍSICA DE LAS PROBETAS RECTANGULARES DE TUBERÍAS DE HORMIGÓN.	53
3.3.4.1.1 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN.	53
3.3.4.1.2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.	55
3.3.4.1.3 DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD.	56
3.3.4.2 EVALUACIÓN QUÍMICA DE LAS PROBETAS DE TUBERÍAS DE HORMIGÓN.	57
3.3.4.2.1 ANÁLISIS DE SULFATOS.	57
3.3.4.2.2 ANÁLISIS DE CLORUROS.	58
3.3.4.2.3 DETERMINACIÓN DEL AVANCE DEL FENÓMENO DE LA CARBONATACIÓN.	62
4. RESULTADOS.	64
4.1 ANÁLISIS FÍSICO.	65
4.2 ANÁLISIS QUÍMICO.	71
5. CONCLUSIONES.	84
ANEXOS.	89

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1: Características para la determinación de la resistencia a la flexión o módulo de rotura.	33
Tabla 2: Influencia de la humedad sobre algunos procesos de deterioro del hormigón.	47
Tabla 3: Característica de la tubería de hormigón.	51
Tabla 4: Característica de las tuberías simples a analizar.	55
Tabla 5: Soluciones patrón de cloruro de sodio.	61
Tabla 6: Preparación de soluciones patrón de cloruro de sodio.	61
Tabla 7: Valores de resistencia a flexión obtenidos a los 0 de días exposición.	65
Tabla 8: Resultados de resistencia a flexión obtenidos a los 0, 30, 60 y 90 de días exposición.	66
Tabla 9: Datos tomados para la determinación del área superficial.	68
Tabla 10: Valores de las absorbancias de los patrones para los sulfatos.	71
Tabla 11: Valores de las absorbancias de la muestra a una profundidad de 3mm.	72
Tabla 12: Resultados del porcentaje de sulfatos en las probetas expuestas a agua con pH 9.	73
Tabla 13: Valores del porcentaje de sulfatos en las probetas expuestas a agua con pH 10.	74

Tabla 14: Valores del porcentaje de sulfatos en las probetas expuestas a agua con pH 13.....	74
Tabla 15: Valores de las absorbancias de los patrones de NaCl.	76
Tabla 16: Valores de las absorbancias de la muestra a una profundidad de 3mm.....	77
Tabla 17: Resultados del porcentaje de cloruros en las probetas expuestas a agua con pH 9.....	78
Tabla 18: Resultados del porcentaje de cloruros en las probetas expuestas a agua con pH 10.....	79
Tabla 19: Resultados del porcentaje de cloruros en las probetas expuestas a agua con pH 13.....	79
Tabla 20: Valores de resistencia a flexión obtenidos a los 0 de días exposición.	89
Tabla 21: Valores de resistencia a flexión obtenidos a los 30 de días exposición en agua con pH 9.....	89
Tabla 22: Valores de resistencia a flexión obtenidos a los 60 de días exposición en agua con pH 9.....	90
Tabla 23: Valores de resistencia a flexión obtenidos a los 90 de días exposición en agua con pH 9.....	90
Tabla 24: Valores de resistencia a flexión obtenidos a los 30 de días exposición en agua con pH 10.....	90
Tabla 25: Valores de resistencia a flexión obtenidos a los 60 de días exposición en agua con pH 10.....	91
Tabla 26: Valores de resistencia a flexión obtenidos a los 90 de días exposición en agua con pH 10.....	91
Tabla 27: Valores de resistencia a flexión obtenidos a los 90 de días exposición en agua con pH 13.....	92
Tabla 28: Valores de las absorbancias de la muestra a una profundidad de 3mm.	96
Tabla 29: Valores de las absorbancias de la muestra a una profundidad de 6mm.	97
Tabla 30: Valores de las absorbancias de la muestra a una profundidad de 6mm.	97
Tabla 31: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 3mm.	98
Tabla 32: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 6mm.	98
Tabla 33: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 9mm.	98
Tabla 34: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 3mm.	99
Tabla 35: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 6mm.	99
Tabla 36: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 9mm.	99

Tabla 37: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 3mm.	100
Tabla 38: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 6mm.	100
Tabla 39: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 9mm.	100
Tabla 40: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 3mm.	101
Tabla 41: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 6mm.	101
Tabla 42: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 9mm.	101
Tabla 43: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 3mm.	102
Tabla 44: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 6mm.	102
Tabla 45: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 9mm.	102
Tabla 46: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 3mm.	103
Tabla 47: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 6mm.	103
Tabla 48: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 9mm.	103
Tabla 49: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 3mm.	104
Tabla 50: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 6mm.	104
Tabla 51: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 9mm.	104
Tabla 52: Resultados del porcentaje de sulfatos en las probetas expuestas a agua con pH 9.	104
Tabla 53: Valores del porcentaje de sulfatos en las probetas expuestas a agua con pH 10.	105
Tabla 54: Valores del porcentaje de sulfatos en las probetas expuestas a agua con pH 13.	106
Tabla 55: Valores de las absorbancias de la muestra a una profundidad de 3mm.	107
Tabla 56: Valores de las absorbancias de la muestra a una profundidad de 6mm.	108
Tabla 57: Valores de las absorbancias de la muestra a una profundidad de 9mm.	109
Tabla 58: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 3mm.	110
Tabla 59: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 6mm.	110

Tabla 60: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 9mm.	110
Tabla 61: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 3mm.	111
Tabla 62: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 6mm.	111
Tabla 63: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 9mm.	111
Tabla 64: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 3mm.	111
Tabla 65: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 6mm.	112
Tabla 66: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 9mm.	112
Tabla 67: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 3mm.	112
Tabla 68: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 6mm.	112
Tabla 69: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 9mm.	113
Tabla 70: de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 3mm.	113
Tabla 71: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 6mm.	113
Tabla 72: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 9mm.	114
Tabla 73: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 3mm.	114
Tabla 74: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 6mm.	114
Tabla 75: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 9mm.	114
Tabla 76: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 3mm.	115
Tabla 77: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 6mm.	115
Tabla 78: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 9mm.	115
Tabla 79: Valores del porcentaje de cloruros en las probetas expuestas a agua con pH 9.	116
Tabla 80: Valores del porcentaje de cloruros en las probetas expuestas a agua con pH 10.	116
Tabla 81: Valores del porcentaje de cloruros en las probetas expuestas a agua con pH 13.	117

LISTA DE GRÁFICAS.

Grafica 1: Resistencia a la flexión expuesta en agua con diferentes valores de pH. Fuente: (Propia).	66
Grafica 2: Isoterma de adsorción-desorción del cemento. Fuente: Laboratorio de Ingeniería de reactores y Catálisis de la Universidad de Cuenca.	67
Grafica 3: Volumen adsorbido con P/P_0 .	68
Grafica 4: t-plot para el cemento. Fuente: Laboratorio de Ingeniería de reactores y Catálisis de la Universidad de Cuenca.	70
Grafica 5: Modelos de t-plot de De Boer.	70
Grafica 6: Curva de calibración para los sulfatos. Fuente: (Propia).	72
Grafica 7: Cambios en el contenido de sulfatos a diferentes profundidades expuestas a una solución con pH 9, 10 y 13. Fuente: (Propia).	74
Grafica 8: Curva de calibración para los cloruros. Fuente: (Propia).	77
Grafica 9: Cambios en el contenido de cloruros a diferentes profundidades expuestas a una solución con pH 9, 10 y 13. Fuente: (Propia).	79
Grafica 10: Cambios en el contenido de sulfatos a diferentes profundidades expuestas a una solución con pH 9. Fuente: (Propia).	105
Grafica 11: Cambios en el contenido de sulfatos a diferentes profundidades expuestas a una solución con pH 10. Fuente: (Propia).	106
Grafica 12: Cambios en el contenido de sulfatos a diferentes profundidades expuestas a una solución con pH 13. Fuente: (Propia).	107
Grafica 13: Cambios en el contenido de cloruros a diferentes profundidades expuestas a una solución con pH 9. Fuente: (Propia).	116
Grafica 14: Cambios en el contenido de cloruros a diferentes profundidades expuestas a una solución con pH 10. Fuente: (Propia).	117
Grafica 15: Cambios en el contenido de cloruros a diferentes profundidades expuestas a una solución con pH 13. Fuente: (Propia).	118

LISTA DE ILUSTRACIONES.

Ilustración 1. Tubos de hormigón en masa.	23
Ilustración 2: Diagrama de proceso de elaboración de tuberías de hormigón.	24
Ilustración 3. Almacenamiento de ripio 3/4.	24
Ilustración 4. Almacenamiento de chispa 3/8.	25
Ilustración 5. Dosificadora por volúmenes de materia prima.	25
Ilustración 6. Hormigón saliendo del proceso de mezclado.	26
Ilustración 7. Mini cargadora utilizada para transportar el hormigón.	26
Ilustración 8. Depósito de hormigón fresco.	27
Ilustración 9. Molde para tubería de diámetro 1500 mm.	27

Ilustración 10. Proceso de llenado de hormigón fresco en el molde de la tubería.....	28
Ilustración 11. Proceso de colocación de la tapa superior, en el sistema vibratorio.	28
Ilustración 12. Colocación del refuerzo para su traslado.	29
Ilustración 13. Anclaje del refuerzo en la grúa mecánica para su traslado.....	29
Ilustración 14. Traslado de la tubería de hormigón de diámetro de 1500 mm para su curado.	30
Ilustración 15. Curado cerrado de tubos de hormigón.....	30
Ilustración 16. Ensayo de resistencia a la flexión.	32
Ilustración 17. Ensayo de resistencia a la flexión.	33
Ilustración 18. Ensayo hidrostático de tuberías.	34
Ilustración 19. Agua en interior del hormigón.	36
Ilustración 20. Formación de ácido sulfhídrico y sulfúrico en alcantarillados.	37
Ilustración 21. Medida de la carbonatación en el hormigón.	46
Ilustración 22: Proceso extracción de probetas del tubo de hormigón.	51
Ilustración 23: Probetas extraídas del tubo de hormigón.	51
Ilustración 24: Dimensiones de las probetas.....	52
Ilustración 25: Solución alcalina de pH 9.	52
Ilustración 26: Tuberías de hormigón que serán sometidas a ensayo de compresión.	55
Ilustración 27: Tubería de hormigón sometida a ensayo de compresión.	56
Ilustración 28: Pesado de la muestra.	59
Ilustración 29: Ataque de la muestra con ácido nítrico.....	59
Ilustración 30: Calentamiento de la muestra a ebullición.	60
Ilustración 31: Proceso de filtrado de las muestras.....	60
Ilustración 32: Soluciones patrón con nitrato de plata.....	61
Ilustración 33: Soluciones patrón con nitrato de plata.....	62
Ilustración 34: Probetas aplicadas solución de fenolftaleína.....	63
Ilustración 35: Diagrama de evaluación fisicoquímica de probetas sometidas a agua con pH alcalino.....	64
Ilustración 36: Ensayo de carbonatación en muestras de tubos antes de ser expuesta a solución alcalina.	80
Ilustración 37: Ensayo de carbonatación en probetas expuestas a agua con pH 9.	81
Ilustración 38: Ensayo de carbonatación en probetas expuestas a agua con pH 10.	81
Ilustración 39: Ensayo de carbonatación en probetas expuestas a agua con pH 13.	82

CLÁUSULA DE DERECHOS DEL AUTOR

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

JORGE LUIS CAMPOVERDE TENESACA con C.I: 0105184873, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "ESTUDIO FÍSICOQUÍMICO EN TUBERIAS DE HORMIGÓN EN AGUA CON pH ALCALINO ELEVADO", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 28 de noviembre de 2017



Jorge Luis Campoverde Tenesaca

C.I: 0105184873

CLÁUSULA DE DERECHOS DEL AUTOR

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

LUIS ALBERTO LEON CONDO con C.I: 0105811996, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "ESTUDIO FISICOQUÍMICO EN TUBERIAS DE HORMIGÓN EN AGUA CON pH ALCALINO ELEVADO", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 28 de noviembre de 2017

A handwritten signature in blue ink, appearing to be "L. A. Leon", written over a horizontal line.

Luis Alberto Leon Condo

C.I: 0105811996

CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Cláusula de Propiedad Intelectual

JORGE LUIS CAMPOVERDE TENESACA con C.I: 0105184873, autor del trabajo de titulación "ESTUDIO FISICOQUÍMICO EN TUBERIAS DE HORMIGÓN EN AGUA CON pH ALCALINO ELEVADO", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 28 de noviembre de 2017

A handwritten signature in blue ink, consisting of a series of loops and flourishes, positioned above a dashed horizontal line.

Jorge Luis Campoverde Tenesaca

C.I: 0105184873

CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Cláusula de Propiedad Intelectual

LUIS ALBERTO LEON CONDO con C.I: 0105811996, autor del trabajo de titulación "ESTUDIO FISICOQUÍMICO EN TUBERIAS DE HORMIGÓN EN AGUA CON pH ALCALINO ELEVADO", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 28 de noviembre de 2017



Luis Alberto Leon Condo

C.I: 0105811996



DEDICATORIA.

A Dios, por haberme dado la salud para lograr todos mis objetivos.

A mis padres Julia y Juan, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores y por ser el pilar fundamental en mí vida.

A mis hermanas, Nancy, Celina, Claudia, Julia y Silvia por su apoyo incondicional.

Luis,

AGRADECIMIENTOS.

A Dios por haberme dado la oportunidad de culminar una etapa más en mi vida.

A mis padres por su apoyo.

Al Dr. Christian Cruzat, director de mi tesis, por sus conocimientos compartidos en esta investigación.

Al Ingeniero Jaime Cuenca y a la Dra. María Montaleza por la amabilidad prestada en el desarrollo de la investigación.

A mi compañero Jorge Campoverde por participación, aporte y conocimientos impartidos en el desarrollo de este trabajo.

Finalmente quiero agradecer a todos mis profesores por sus enseñanzas a lo largo de todos estos años.

Luis,

DEDICATORIA.

Esto va dedicado en especial a las dos personas más importantes para cualquier ser humano, a las personas, las cuales dieron origen de todo lo que soy, hoy en día, simplemente mis padres los cuales a pesar de toda adversidad me han sabido brindar de manera incondicional su apoyo, y más que eso su amor, esto es para ellos, para mi mamita Geracha: persona llena de bondad y cariño y mi padre Egui: persona que me ha inculcado la disciplina de enfocarse en alma, mente y corazón en lo que uno realmente lo apasiona hacer, y obtener siempre así los mejores resultados.

También va dedicado a mis dos hijos (Jeanelle y Nikola), los cuales me han servido siempre de motor e inspiración de superar siempre mis propias expectativas, y a ellos darles el mejor ejemplo no como ser perfecto, sino como un ser humano con virtudes y defectos, sabiendo que si se le pone el mayor de los esfuerzos nada es imposible, únicamente hay que tener fe en uno mismo.

Me ayudaste a ser quien soy, forjando mi personalidad y ayudándome hasta donde te era posible, incluso más que eso.

Muchas gracias amor.

Jorge,

AGRADECIMIENTO.

Al termino de este trabajo, es inevitable no recordad a todas aquellas personas que siempre están ahí apoyándonos con la mejor de las intenciones.

A mi director de tesis el Doc. Christian Cruzath, por al estar pendiente siempre en cada uno de ellos aspectos de la realización de este trabajo, de su apoyo y confianza en nuestro trabajo y que no faltaba siempre su buen criterio y capacidad para guiarnos en este gran paso. Las mayores de las gracias para ud Doctor.

Quiero expresar también mi más sincero agradecimiento a mi compañero Luis Leon por su gran aporte y participación activa en el desarrollo de esta tesis. Debo destacar, por encima de todo, su disponibilidad y paciencia que hizo que nuestras siempre acaloradas discusiones culminaran benéficamente tanto a nivel científico como personal. No cabe duda que su participación ha enriquecido el trabajo realizado y, además, ha significado el surgimiento de una sólida amistad. Espero verte siempre en las mejores circunstancias y recuerda en mi tendrás un amigo real, y te considero uno de ellos.

Mi amor, la ayuda que me has concedido, siempre ha sido importante, estuviste a pesar de todo a mi lado, inclusive en los momentos y situaciones más difíciles y tormentosas, enfocándote siempre en buscar una solución. Quiero que sepas que no fue sencillo culminar con este proyecto, pero destaco amor, siempre tus palabras y acciones motivadoras y esperanzadoras, que siempre me mencionabas que era capaz de lograrlo, y gracias a ti hoy soy feliz, y lo hice amor.

Jorge,

1. INTRODUCCIÓN.

Las tuberías de hormigón poseen propiedades mecánicas como resistencia a la flexión y a la tracción, ya que estos artefactos deben tener buenas cualidades mecánicas, debido que se encuentra expuestos a diversos agentes físicos y químicos, enfrentando un deterioro de forma predominante que reduce la vida útil del sistema de tuberías y aumenta los costos de mantenimiento y rehabilitación (Mahmoodian & Alan).

En la actualidad la mayoría de los efluentes desechados por las industrias que son transportados por los ductos, han tenido un aumento considerable de las concentraciones de sustancias químicas, a causa de la industrialización que ha surgido en la ciudad y a consecuencia de esto, las aguas residuales podrían tener un pH extremo en ácido o básico (Torres Dávila, 2012).

Es por estos motivos, que es de suma importancia conocer los efectos de los compuestos resultantes (sulfatos, cloruros y carbonatos) y comprobar si estos presentan posibles interacciones químicas en un ambiente alcalino. Ya que, con los resultados obtenidos en esta investigación (Torres Dávila, 2012), empresas públicas como privadas podrán entender en gran porcentaje los efectos que pudiesen manifestarse en las tuberías de hormigón expuestas a aguas alcalinas, y al mismo tiempo tratar de cuantificar de manera muy acertada, la vida útil de las tuberías de hormigón. Incluso se podrían encausar nuevas normas de fabricación de los tubos de hormigón.

1.1 RESEÑA HISTÓRICA. LA EMPRESA.

PREFABRICADOS DEL AUSTRO antiguamente formaba parte de una sociedad, de fabricación de tubos en el sector de Milchichig, pero a partir del año 1997 se produce una división y el señor Luis Puma, funda PREFABRICADOS DEL AUSTRO, que en el primer año elaboraba únicamente bloques, debido a que se tomaría cerca de un año el ensamblaje de las maquinarias requeridas para el proceso de producción de las tuberías.

La empresa se encuentra ubicada en la Panamericana Norte Km. 14, perteneciente a la parroquia Llacao, de la Ciudad de Cuenca (Puma Guapisaca, 2011).

1.2 PRINCIPALES MATERIALES QUE SE UTILIZA EN LA FABRICACIÓN DE TUBOS.

Para la elaboración de las tuberías se utiliza una serie de materiales, los cuales se detallan a continuación.

1.2.1 CEMENTO.

El cemento debe ser elaborado según la norma INEN 152, además el contenido de este, no debe ser menor que 350 Kg/m^3 en la mezcla de hormigón a emplearse en las tuberías.

1.2.2 LOS ÁRIDOS O AGREGADOS.

Todas las gravas y las arenas constituyen la estructura granular de la tubería de hormigón. Estos áridos se producen de manera natural (fluvial o glacial). Los áridos no deben interferir con el endurecimiento del cemento y la resistencia del hormigón.

En la norma técnica ecuatoriana INEN 872, se encuentran todos los requisitos de los áridos para la elaboración de cada tipo de hormigón.

A continuación, se detalla los tipos de áridos que la empresa utiliza:

✓ **RIPIO 3/4.**

Es un árido chancado con aristas de canto vivo, proveniente de bancos naturales del sector de Santa Isabel (Azuay, Ecuador).

✓ **CHISPA 3/8.**

Es un agregado grueso de primera calidad, que se obtiene a partir de un proceso de explotación, trituración y cribado de roca sólida, se encuentra libre de impurezas. Posee una graduación granulométrica bien controlada con tamaños entre 2.36 a 9.5 mm, además de una forma y textura idónea para la elaboración de concretos.

✓ **ARENA.**

La arena proviene de bancos naturales del sector de Santa Isabel (Azuay, Ecuador). Este árido cumple con la norma INEN 696, con un módulo de fineza de 2,65.

1.2.3 AGUA.

El agua, es un factor fundamental por lo que debe ser analizada antes de utilizarse. Por lo general se debe percatar que no se encuentren restos de grasas y aceites, detergentes, sustancias en suspensión, olores (olores característicos de sulfuro de hidrogeno), contenidos de ácidos y materia orgánica (Sika, 2012). El agua utilizada por la empresa proviene del rio Paute.

1.2.4 ADITIVOS.

Se denominan aditivos a aquellas sustancias que se incorporan al hormigón, antes o durante el mezclado en una proporción no superior al 5% de la masa del cemento, producen la modificación deseada en estado fresco y/o endurecido, de algunas de sus características, propiedades habituales o de su comportamiento (Sika, 2008).

Por lo general utilizan 3 tipos de aditivos.

- ✓ **PLASTIFICANTE.**

Se llega a utilizar un máximo de 350 cm³ por cada 50 Kg de mezcla.

- ✓ **REDUCTORES DE AGUA.**

Al igual que los plastificantes se llega a utilizar un máximo de 350 cm³ por cada 50 Kg de mezcla.

- ✓ **ACELERANTES.**

Son aquellos cuya función principal es reducir el tiempo de fraguado del cemento. Normalmente la empresa utiliza acelerantes cuando se requiere entregas especiales. Por lo general se utiliza 750 cm³ por cada 50 Kg de mezcla de hormigón.

1.3 CLIENTES.

Los clientes de PREFABRICADOS DEL AUSTRO son variados, pero aproximadamente se estima que del 5 al 10% solo se expende en el sector privado, mientras que el 80% vende al sector público.

1.4 TUBOS DE HORMIGÓN.

Los tubos de hormigón se utilizan frecuentemente en sistemas de alcantarillado transporte de aguas pluviales, líneas de bombeo, estaciones de bombeo, como túneles etc. Por lo anterior es que las tuberías de hormigón se encuentran expuestas a diversos efectos nocivos durante su vida útil (Bnci, Durgun, Rzaolu, & Koluçolak, 2012), los cuales son susceptibles a ataques químicos, biogénicos, congelación-descongelación, corrosión, abrasión, ingreso de iones sulfato, que producen una degradación química del hidróxido de calcio y alúmina, que conduce al deterioro, formación de etringita ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) y yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Pedefferri et al., 2013).

1.4.1 TUBERIAS DE HORMIGÓN EN MASA.

Son aquellas que no contiene en su interior armaduras de acero. Este tipo de tuberías son solo aptas para resistir esfuerzos de compresión (Puma Guapisaca, 2011).



Ilustración 1. Tubos de hormigón en masa.
Fuente: (Propia).

1.4.2 TUBERIAS DE HORMIGÓN ARMADO.

Son aquellas que en su interior posees armaduras de acero, debidamente calculadas y situadas. Estas tuberías son es apto para resistir esfuerzos de compresión y tracción (Puma Guapisaca, 2011).

1.5 PROCESO DE FABRICACIÓN DE TUBOS DE HORMIGÓN.

La empresa PREFABRICADOS DEL AUSTRO utiliza los siguientes procesos para la elaboración de tuberías de hormigón, que está comprendido en diferentes etapas explicadas a continuación.

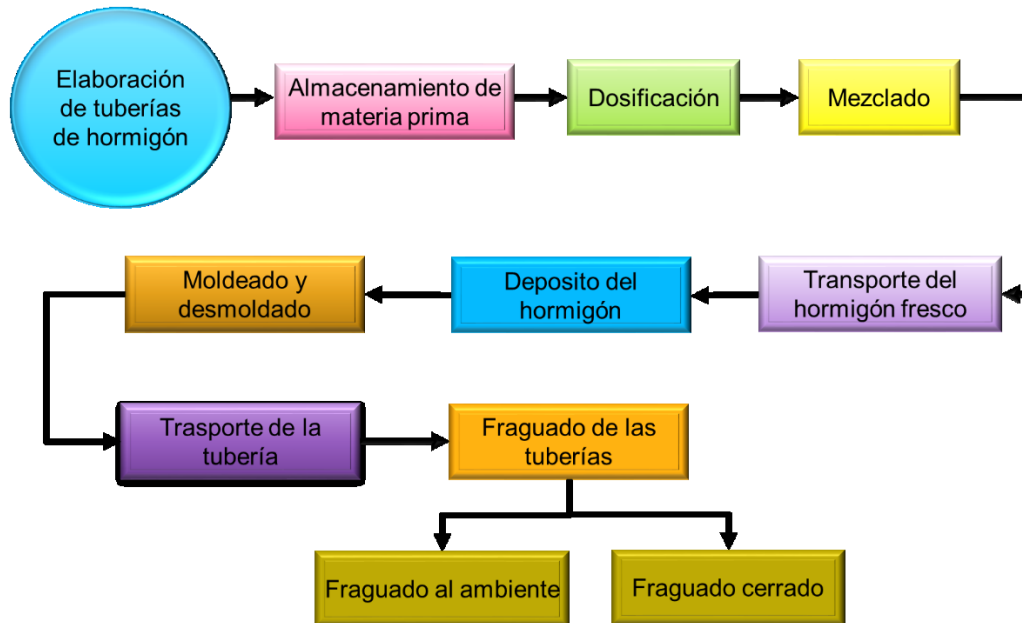


Ilustración 2: Diagrama de proceso de elaboración de tuberías de hormigón.
Fuente: (Propia).

1.5.1 ALMACENAMIENTO DE MATERIA PRIMA.

En esta área se encuentra almacenada la materia prima como la arena, el ripio 3/4 y la chispa 3/8, que ha sido transportado por volquetes, desde diferentes proveedores.



Ilustración 3. Almacenamiento de ripio 3/4.
Fuente: (Propia).



Ilustración 4. Almacenamiento de chispa 3/8.
Fuente: (Propia).

1.5.2 DOSIFICACIÓN.

En esta área la materia prima cae hacia la dosificadora que se encuentra debajo de los depósitos. Posteriormente se mezcla toda la materia prima (arena, ripio y chispa).

La dosificación de la materia prima varía de acuerdo al producto que se vaya a fabricar.



Ilustración 5. Dosificadora por volúmenes de materia prima.
Fuente: (Propia).

1.5.3 MEZCLADO.

En esta zona, la materia prima dosificada en la etapa anterior, se mezcla con los aditivos, cemento y el agua necesaria para cada producto, y se deja actuar en la mezcladora por tiempos acorde al producto que se vaya a elaborar, así por ejemplo en el caso de tubos con diámetro de 1500 mm el tiempo de mezclado oscila entre 25 a 30 minutos.



Ilustración 6. Hormigón saliendo del proceso de mezclado.
Fuente: (Propia).

Una vez cumplido el tiempo de mezcla, el hormigón cae por un lado de la mezcladora, para ser posteriormente trasladado hacia los moldes.

1.5.4 MOLDEADO Y DESMOLDADO.

El hormigón formado en la etapa anterior es llevado por una mini cargadora hacia un depósito de hormigón fresco, que a su vez actúa como homogenizador, el mismo que transporta y coloca el hormigón en los diversos moldes.



Ilustración 7. Mini cargadora utilizada para transportar el hormigón.
Fuente: (Propia).



Ilustración 8. Depósito de hormigón fresco.
Fuente: (Propia).

Los moldes se ubican en el suelo en forma de cilindros huecos, en el caso de los tubos a reforzar contienen un mallado de hierro adicional, caso contrario se realiza el procedimiento directamente.



Ilustración 9. Molde para tubería de diámetro 1500 mm.
Fuente: (Propia).

Posteriormente se procede a realizar el llenado del molde con el hormigón fresco y homogenizado.



Ilustración 10. Proceso de llenado de hormigón fresco en el molde de la tubería.

Fuente: (Propia).

Una vez llenado el hormigón en el molde, se coloca una tapa superior y se conecta a un sistema vibratorio, que posee 4 motores. Este sistema vibratorio permite que el hormigón se distribuya uniformemente y se compacte. El tiempo que debe actuar este sistema vibratorio va a depender del tipo de producto, el que tiene en promedio 5 minutos.



Ilustración 11. Proceso de colocación de la tapa superior, en el sistema vibratorio.

Fuente: (Propia).

Para el proceso de desmolde, se coloca en la parte superior del tubo un refuerzo, de esta manera permite el traslado del tubo hacia la zona de curado o fraguado mediante el uso de grúas mecánicas.



Ilustración 12. Colocación del refuerzo para su traslado.
Fuente: (Propia).



Ilustración 13. Anclaje del refuerzo en la grúa mecánica para su traslado.
Fuente: (Propia).



Ilustración 14. Traslado de la tubería de hormigón de diámetro de 1500 mm para su curado.

Fuente: (Propia).

1.5.5 FRAGUADO DE LAS TUBERÍAS DE HORMIGÓN.

El proceso de curado o fraguado se realiza por dos métodos:

1.5.5.1 FRAGUADO CERRADO.

Aquí, se coloca un plástico cubriendo completamente al tubo y se reutiliza el agua de evaporado, el cual se condensa en la parte superior del plástico e hidrata nuevamente al tubo. Este es un ciclo, en el cual se optimiza el uso del agua. Este tiempo de fraguado demora aproximadamente 5 días, y se espera 23 días de secado.



Ilustración 15. Curado cerrado de tubos de hormigón.

Fuente: (Propia).

1.5.5.2 FRAGUADO AL AMBIENTE.

En este caso se utilizan aspersores de agua programados para hidratar los tubos en los 28 días de fraguado. En este método no es necesario la utilización de plástico para cubrir los tubos.

1.6 MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS TUBOS DE HORMIGÓN.

Las propiedades de las tuberías de hormigón influyen directamente con su durabilidad y son:

- Resistencia a la flexión.
- Resistencia hidrostática.
- Absorción.
- Alcalinidad.
- Requisitos generales de acabado.

1.6.1 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN.

Se relaciona con consideraciones estructurales y no de durabilidad, depende directamente del tipo de cemento, agregados y proceso de fabricación.

1.6.1.1 MÉTODO DE LOS TRES APOYOS.

Mediante este ensayo se clasifican las tuberías según sus resistencias. Este ensayo consiste en colocar el tubo sobre dos apoyos que se extienden a lo largo del tubo, posteriormente se aplica una carga vertical de compresión a través de un tercer apoyo en la parte superior de igual longitud, paralelo a los apoyos inferiores. Este procedimiento se lo realiza de acuerdo a la norma INEN 1587. (Amancha, 2012).



Ilustración 16. Ensayo de resistencia a la flexión.

Fuente: (Enciclopedia construcción, n.d.)

1.6.1.2 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN SEGÚN LA NORMA NTE INEN-ISO 10545-4.

La norma NTE INEN-ISO 10545-4 Primera edición 2014-01 contempla dos magnitudes importantes, para evaluar la resistencia mecánica:

- **Fuerza de rotura.** Relación directa con la carga aplicada sobre la probeta expresada en newton (N). El resultado de este ensayo es en función del grosor de la probeta.
- **Módulo de rotura.** También denominado resistencia a la flexión, que se deduce de la magnitud fuerza de rotura a través de una fórmula matemática. El resultado del ensayo, expresado en newton por metro cuadrado (N/m²), nos aproxima a la resistencia mecánica de la probeta.

$$R = \frac{3FL}{2bh^2} = \frac{3S}{2h^2} \quad (1)$$

El resultado se expresa en (N/m²).

Para ello se considera lo siguiente:

Tabla 1: Características para la determinación de la resistencia a la flexión o módulo de rotura.

CÓDIGO.	CARACTERÍSTICA.	DEFINICIÓN.
F	CARGA DE ROTURA.	Fuerza necesaria para causar la rotura de la probeta, expresada en Newton (N).
S	FUERZA DE ROTURA.	$S = F \cdot (L/b)$ Unidades en Newton (N).
R	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN O MÓDULO DE ROTURA.	<p>Magnitud expresada en Newton por metro cuadrado (N/m^2), obtenida al dividir la fuerza de rotura por el cuadrado del grosor mínimo en la sección de rotura.</p> $R = \frac{3FL}{2bh^2} = \frac{3S}{2h^2}$ <p>(N/m^2)</p> <ul style="list-style-type: none"> • L=Distancia de separación entre los apoyos. • b=grosor de la probeta. • h=espesor mínimo, expresado en metros, de la probeta en la sección de rotura, medido tras el ensayo.

Fuente: (Instituto de promoción de cerámica, 2004).

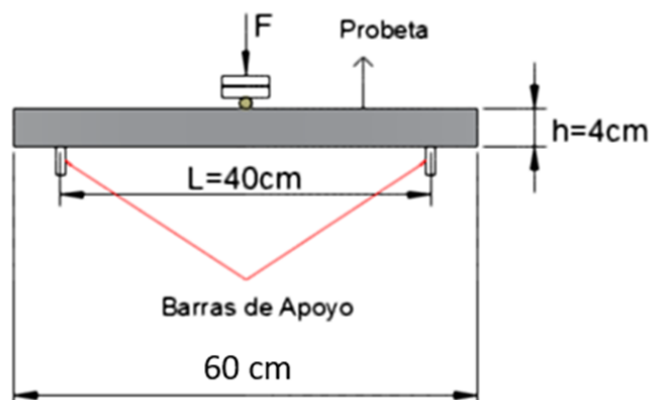


Ilustración 17. Ensayo de resistencia a la flexión.

Fuente: (Propia.)

1.6.2 RESISTENCIA HIDROSTÁTICA.

Por lo general una red de alcantarillado no trabaja a presión, pero debido a que puede haber variaciones de caudal u obstrucciones de alguna tubería, es preferible ensayar las tuberías a una presión hidrostática como prueba que el elemento resistirá las presiones internas. Esto también permite determinar la permeabilidad contra filtraciones. Durante el ensayo la tubería no debe mostrar ninguna fuga, cualquier humedad que se presente en la superficie como manchas sin que se formen gotas, no se considera fuga (Amancha, 2012).

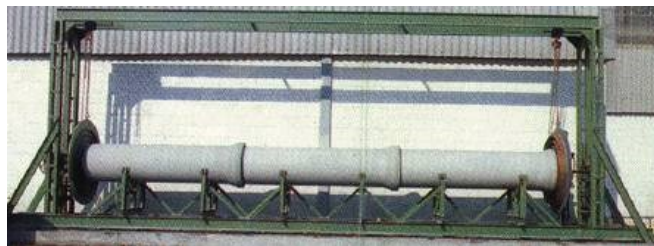


Ilustración 18. Ensayo hidrostático de tuberías.

Fuente: (Enciclopedia construcción, n.d.)

Por lo general el procedimiento para este ensayo se lo realiza de acuerdo a la norma INEN 1589.

1.6.3 ABSORCIÓN.

Este es un indicador de la porosidad del concreto, con el cual se asegura la calidad de los tubos, esta propiedad depende de la absorción de cada componente del hormigón, así como del proceso de fabricación. En la norma INEN 1588 se describen dos procedimientos para realizar este análisis. (Manual ATHA, 2015).

1.6.4 ALCALINIDAD.

La alcalinidad del hormigón tiene influencia en su capacidad de resistir ambientes ácidos, y se define en términos de cantidad de ácido que una masa conocida de material puede neutralizar, comparada con la capacidad de neutralización del carbonato cálcico (CaCO_3). La

alcalinidad final de una tubería depende de los valores de la alcalinidad de cada componente del hormigón (Manual ATHA, 2015).

1.6.5 REQUISITOS GENERALES DEL ACABADO.

En las tuberías se debe considerar que las grietas superficiales no sean de longitudes mayores a 5 cm, ni atraviesen sus paredes. El tubo además debe llevar en uno de sus extremos un rotulado que debe constar lo siguiente: la marca de fábrica, la fecha de fabricación, el diámetro interno nominal, la clase del tubo y la norma INEN de referencia (Amancha, 2012).

1.7 pH EN LAS TUBERIAS DE HORMIGÓN.

El pH es un parámetro muy importante que indica el nivel de alcalinidad que tiene el hormigón. El principal daño del hormigón se produce a causa del descenso del nivel de alcalinidad, por lo tanto, es muy importante realizar un control del pH ya sea sobre el concreto fresco o endurecido. Debido al importante papel del pH con respecto a la durabilidad de las estructuras de hormigón, se recomienda desarrollar un método de ensayo estándar específico para medir el pH del hormigón con un alto nivel de precisión, repetitividad y reproducibilidad (Arenzana et al., 2002).

1.8 TRANSPORTE DE LOS MEDIOS AGRESIVOS EN EL INTERIOR DE LAS TUBERIAS.

Las moléculas de CO_2 y de los iones Cl^- penetran en el interior del hormigón mediante difusión por la red porosa. El mecanismo de la difusión se produce por diferencias de concentración entre una zona de mayor a otra de menor. Intentando establecer un equilibrio (D'Andrea, 2010).

1.9 DETERIORO DE LAS TUBERIAS DE HORMIGÓN.

El deterioro de las tuberías de hormigón por lo general es debido a causas físicas y/o químicas y en ocasiones estas se encuentran interrelacionadas o combinados. Se ha investigado (Britain et al., 1991) que los nutrientes proporcionados por las aguas residuales son los principales factores para la corrosión microbiana, en el hormigón la corrosión dependerá de los niveles de pH. Así en pH menores de 13 se forma yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en la superficie del tubo. Por otra parte, la etringita

$(3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O})$ se forma cuando los niveles de pH son superiores a 8. La presencia de etringita ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$) aumenta el volumen de la estructura del sólido provocando expansión y fisuración, causando un ablandamiento y pérdida de resistencia del hormigón (Barry Butler et al., 2001) .

1.10 FENÓMENOS QUE AFECTAN LA DURABILIDAD TUBERIAS DE HORMIGÓN.

1.10.1 CICLOS DE HIELO/DESHIELO.

Las exposiciones causadas por ciclos de hielo/deshielo en las tuberías de hormigón es originada cuando la temperatura se encuentra por debajo de 0°C , debido a que el agua que se encuentra en los poros puede congelarse, causando un aumento de volumen de hasta un 9%, produciendo un aumento en las tensiones, que pueden dar lugar a fisuras o desprendimiento del hormigón. La congelación del agua de los poros comienza en las capas exteriores (poros más grandes) y se extiende a las partes internas (poros más pequeños) (Pedefferri et al., 2013).

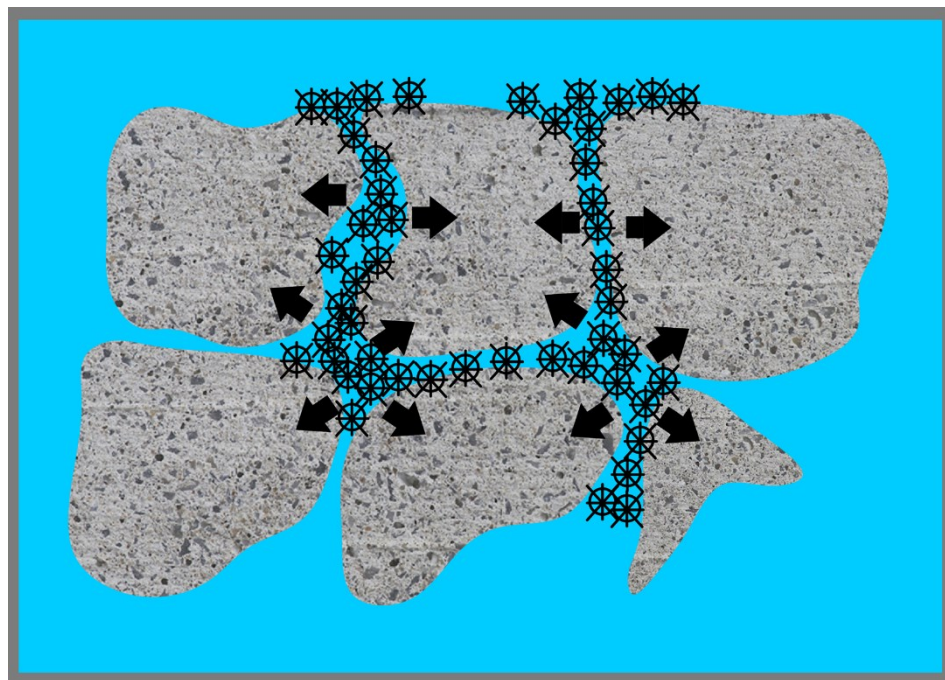


Ilustración 19. Agua en interior del hormigón.

Fuente: (Propia.)

1.10.2 ATAQUE POR ÁCIDOS.

Las estructuras de concreto transportan aguas residuales como ocurre en las tuberías de alcantarillado, estaciones de bombeo, plantas de tratamiento, etc., donde el sulfato en condiciones anaeróbicas se reduce a sulfuro de hidrógeno por acción de las bacterias anaeróbicas. El sulfuro de hidrógeno formado se oxida a ácido sulfúrico por acción de las bacterias y el ácido formado ataca a las paredes de las estructuras del hormigón (Pedferri et al., 2013). Este proceso se puede observar en las siguientes ecuaciones.

Reacción 1.

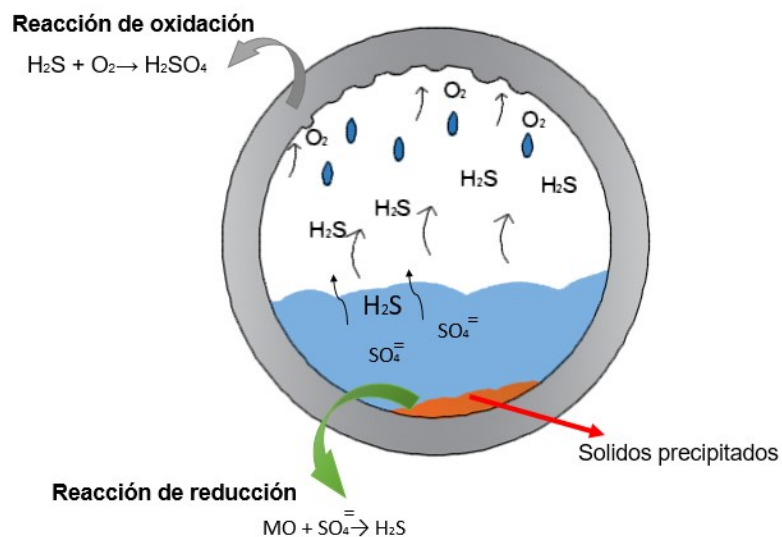
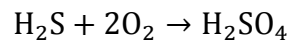


Ilustración 20. Formación de ácido sulfhídrico y sulfúrico en alcantarillados.

Fuente: (Propia.)

Los componentes hidratados como la portlandita $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ y los sulfoaluminatos $(3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O})$ en la matriz del hormigón se encuentran en equilibrio con el líquido poroso que se caracteriza por tener un elevado valor de pH, debido a la presencia de los iones hidroxilos OH^- , generalmente de sodio y potasio. Cuando el hormigón entra en contacto con soluciones ácidas, estos compuestos pueden disolverse con una velocidad que dependerá de la

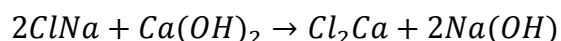
permeabilidad del hormigón, la concentración y el tipo de ácido. Entre los principales ácidos que pueden atacar al concreto se encuentran: el ácido sulfúrico (H_2SO_4), el ácido clorhídrico (HCl), el ácido nítrico (HNO_3), ácidos orgánicos como el ácido acético (CH_3COOH) y los ácidos húmicos. El ataque por los ácidos dependerá de la solubilidad de las sales formadas y tipo aniones implicados en la reacción (Peddeferri et al., 2013). Se ha investigado que la mayoría de los daños en los sistemas de alcantarillado es causado por el ataque de ácido sulfúrico biogénico (ácido producido mediante la inducción de microorganismos) (Fernandes et al., 2012).

Cuando el pH de la superficie hormigón se encuentra entre 11 y 13, el hidróxido de calcio de la estructura del hormigón neutraliza los ácidos y produce la inhibición de la formación de bacterias, pero esto ocurre cuando la tubería es nueva, a medida que pasa el tiempo, el hidróxido de calcio se va neutralizando y así el pH de la superficie del hormigón disminuye, como consecuencia, se presenta un aumento de bacterias, lo que provoca una mayor formación de ácido sulfhídrico y posterior oxidación a ácido sulfúrico. El ácido producido ataca al hidróxido de calcio de la estructura del concreto, dando lugar a la formación de yeso, el cual cristaliza, aumentando su volumen y provocando expansiones en la tubería. Además, este puede reaccionar con el aluminato tricálcico (C_3A) dando lugar a la formación de etringita, que al igual que el yeso, incrementa su volumen. Las sales formadas generan tensiones adicionales en la estructura, provocando grietas, hasta que finalmente la tubería falla (Sulikowski & Kozubal, 2016).

1.10.3 ATAQUE POR CLORUROS.

Los ataques por cloruros son una gran amenaza para las tuberías de hormigón y se producen en soluciones con altas concentraciones de este compuesto, como lo son las aguas marinas y aguas de minas (Sulikowski & Kozubal, 2016). El cloruro de sodio reacciona con la portlandita según la reacción siguiente:

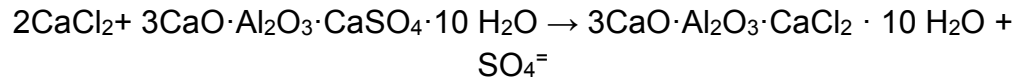
Reacción 2.



El aluminato tricalcico (C_3A) reaccionan con el cloruro de calcio que se encuentran en los poros de la estructura del hormigón, para formar el

monocloroaluminato hidratado o sal de Friedel
($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) según la siguiente reacción:

Reacción 4.



Esta sal formada es expansiva y provoca fisuras en la estructura del hormigón.

El coeficiente de difusión de cloruros a través del hormigón es un parámetro muy importante que se encuentra relacionado con la durabilidad del hormigón (Fontalvo, Tovar, & Ortiz, 2016).

1.10.3.1 MECANISMOS DE PENETRACIÓN DE CLORUROS.

Los cloruros pueden penetrar en el hormigón según los siguientes mecanismos: permeabilidad, capilaridad, absorción y difusión; tanto la permeabilidad como la absorción son mecanismos de transporte rápido, mientras que la difusión es más lenta. Estos mecanismos de penetración están dados por las condiciones de exposición, contenido de humedad y la estructura de los poros (Bermúdez Odriozola, 2007). Para la determinación de la migración de los cloruros en el hormigón se utiliza el método de perfil de concentración de cloruros, para lo cual se debe determinar el contenido de cloruros en la superficie y a diferentes profundidades. Luego de esto se toma una muestra de polvo y se aplica la norma ASTM-114 (Tovar, Ortiz, Paola, & Durán, 2013).

1.10.3.2 MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE CLORUROS EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN.

Existen técnicas destructivas y no destructivas para la determinación de cloruros en las estructuras de hormigón.

NO DESTRUCTIVAS.

- Resonancia magnética nuclear (RMN).
- Fluorescencia de rayos-X (XRF).

La muestra se extrae en polvo y se deseca a 105°C hasta peso constante. Posteriormente puede ser analizada por los métodos anteriormente descritos.

DESTRUCTIVAS.

- Valoración potenciométrica.
- Espectroscopia infrarroja o ultravioleta-visible.

Las muestras deben ser desecadas hasta peso constante a 105 °C, posteriormente se digieren con ácido nítrico concentrado en caliente para extraer la mayor cantidad posible de cloruros. Finalmente, estas muestras son filtradas y analizadas por los métodos anteriormente citados.

Otra técnica para determinar los cloruros es mediante pruebas con luz ultravioleta, en el cual una solución indicadora de nitrato de plata se pulveriza como un fino aerosol en la superficie del hormigón recién fracturado. La superficie se expone a los rayos ultravioleta solares o artificiales, los que producen una coloración azul-gris en las áreas que contienen iones de cloruros libres y en las áreas sin cloruros persiste el color marrón (Beddoe, 2010).

1.10.3.3 DETERMINACIÓN DE CLORUROS POR ESPECTROSCOPIA.

Este método se basa en la medida de la turbidez provocada por la precipitación del AgCl en una disolución de HNO₃, en presencia de un exceso conocido de AgNO₃ 0,1 N. Se opera utilizando patrones de NaCl con concentraciones entre 0 y 5 ppm. El método se ve afectado por la precisión del peso de la muestra y por el factor de dilución empleado.

Otros factores que influyen en la determinación de la turbidez son:

- La absorción colorimétrica de la disolución.
- La influencia de diversos factores como: temperatura, tiempo, pH y otros que afecten a la formación del precipitado de cloruro de plata.

La influencia del pH es muy marcada, no solamente debe ser en medio neutro o ligeramente ácido para evitar la formación de hidróxido de plata, sino que, también se debe tomar en consideración las condiciones de formación del precipitado de

cloruro de plata y su posterior comportamiento en la turbidimetría, que tiene que ser de 0,5 o inferior, zona en la cual no se ve afectada por posibles variaciones.

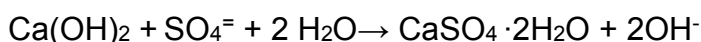
1.10.4 ATAQUE POR SULFATOS.

Los sulfatos presentes en el efluente que trasporta un sistema de alcantarillado pueden tener un origen biológico o industrial, o simplemente, encontrarse en la naturaleza, como por ejemplo en el agua de mar y en los suelos selenitosos.

Los productos del cemento sometidos a un ataque por sulfatos presentan un aspecto blanquecino característico, por lo general, el daño comienza en los bordes y esquinas, posteriormente se produce el agrietamiento progresivo, que finalmente reduce al hormigón a un estado blando (Matti, 1985). Además, se ha estudiado que el sulfato de magnesio es más agresivo que el sulfato de sodio a causa de la disminución del pH del agua en los poros y en la pasta de cemento hidratada (Neville, 2004).

El ataque por sulfatos produce una disminución de la resistencia del hormigón debido a la pérdida de cohesión entre los productos de hidratación. Los productos expansivos generados producen agrietamientos en el hormigón, a causa de esto, aumenta la permeabilidad, permitiendo así la entrada de otros agentes que pueden acelerar el deterioro (Aguirre & Mejia de Gutierrez, 2013). Los aluminosilicatos e hidróxido de calcio presentes en el hormigón son más susceptibles al ataque de sulfatos, así el hidróxido de calcio reacciona con los iones sulfatos para formar yeso, según la siguiente reacción:

Reacción 5.



Los sulfatos reaccionan con los aluminatos cálcicos, formando etringita, según la reacción:

Reacción 7.



La formación de la etringita es perjudicial, debido a que produce efectos de expansión, como se mencionó anteriormente, por esta razón no se recomienda utilizar cementos que contengan un 8% o más de aluminato tricalcico (C_3A) y no se utilicen en ambientes que puedan estar contaminados de sulfatos (Hossain & Lachemi, 2006).

La severidad del ataque dependerá de la concentración de los iones sulfatos en el medio en el que se encuentra expuesto el hormigón (Aguirre & Mejia de Gutierrez, 2013). Cuando existe presencia de CO_2 , humedad relativa mayor al 95% y bajas temperaturas, los sulfatos reaccionan con el hidróxido de calcio y el silicato cálcico hidratado (C-S-H), formando taumasita ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$), generando pérdida de la resistencia del hormigón (Pedeferrri et al., 2013).

Los sulfatos en su forma de taumasita (TSA), que es una sal compleja ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$), produce daños en los hormigones de manera expansiva. El grado de ataque de sulfatos en su forma TSA, dependerá de las condiciones de exposición, concentración de sulfato, temperatura, humedad relativa y los componentes del hormigón (Rahman et al., 2014). Algunas investigaciones dan cuenta que la formación de TSA se produce a elevadas concentraciones de sulfatos y a temperaturas menores de 15°C (Blanco, n.d.). Así como también se recalca que la TSA sólo se forma a un pH por encima de 10,5 y que este es el principal causante del deterioro del hormigón (Hill et al., 2003). Por otro lado, se llegó a la conclusión de que, cuando el hormigón es afectado por la formación de TSA y a sido expuesto a cloruros externos, ahí un aumento del riesgo de corrosión del acero, por lo que la formación de TSA contribuye a la corrosión del hormigón armado (Hobbs & Taylor, 2000).

El modelo de ataque por sulfatos se basa en que los iones migran del entorno agresivo hacia el hormigón y de esta manera conducen a un daño estructural. El grado de deterioro dependerá de la concentración de iones sulfato como los tipos de iones que le acompañan. Según Bellmann, Erfurt, & Ludwig, el ataque del sulfato es acelerado por los bajos valores de pH, debido a una combinación con la lixiviación inducida por un ataque ácido (Bellmann, Erfurt, & Ludwig, 2012).

1.10.4.1 DETERMINACIÓN DE SULFATOS POR ESPECTROFOTOMETRÍA.

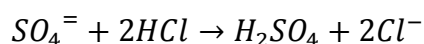
Los sulfatos se encuentran en cantidades permitidas dentro de la composición de las tuberías de hormigón, pudiendo ir desde unos pocos miligramos por litro hasta gramos por litro (caso de los cementos sulforesistentes). Es bien sabido que algunos drenajes de minería pueden contribuir, en grandes cantidades de sulfatos a través de la oxidación de la pirita.



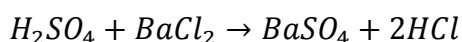
Los contenidos de sulfatos son importantes, ya que las aguas con un contenido excesivo de sulfatos tienden a formar incrustaciones.

El ion SO_4^{2-} forma una suspensión con el cloruro de bario (BaCl_2) en presencia de ácido acético, para formar cristales de sulfato de bario (BaSO_4) de tamaño uniforme, es por esto que en el método turbidimétrico se utiliza un instrumento llamado nefelómetro que es capaz de medir partículas suspendidas en un líquido, para lo que utiliza una fotocelda colocada en un ángulo de 90° respecto a una fuente de luz. La cantidad de luz que refleje una determinada densidad de partículas depende de las propiedades de las partículas, tales como su forma, su color y su reflectividad. Al medir la dispersión de la luz de la suspensión de BaSO_4 , se puede determinar la concentración de SO_4^{2-} , previa a la elaboración de una curva de calibración.

Reacción 8.



Reacción 9.



El grado de sensibilidad de este método va de 3 a 40 mg SO_4^{2-} /L. En el caso de tener muestras con concentraciones superiores a este valor, se debe usar diluciones.

1.10.4.2 INTERFERENCIAS QUE SE PRESENTAN EN LA DETERMINACION LOS SULFATOS.

1.10.4.2.1 EL COLOR. El color en el caso de ser demasiado oscuro, puede interferir con la determinación, y se tiene que eliminar por filtración.

1.10.4.2.2 LA SILICE. En cantidades superiores a 500 mg/L podría interferir, para ello se hacen diluciones.

1.10.5 CARBONATACIÓN

La carbonatación es un proceso físico-químico complejo que modifica la estructura del hormigón en el curso del tiempo e induce a cambios

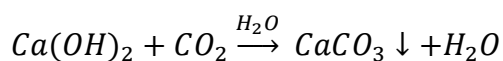
en sus propiedades (Castellote, Andrade, Turrillas, Campo, & Cuello, 2008).

Las altas concentraciones de CO_2 en las aguas residuales (Aguirre-Guerrero, Mejía-De-Gutiérrez, & Montês-Correia, 2016), produce una reacción del dióxido de carbono con los constituyentes alcalinos del hormigón, esto hace que el pH de la solución en los poros, disminuya desde sus valores normales (pH 13 -14), a valores próximos a la neutralidad (Pedferri et al., 2013). Debido al consumo del hidróxido de calcio, el valor de pH en la solución de los poros en el hormigón, se reduce por debajo de 9. La carbonatación disminuye la porosidad en el hormigón nuevo y hace que la estructura carbonatada sea más fuerte, por lo que la carbonatación es una ventaja en el hormigón no reforzado. Sin embargo, es una desventaja en el hormigón reforzado, ya que la carbonatación disminuye el pH en los poros, y puede debilitar la estructura reforzada que está protegida contra la corrosión por una película pasiva, que es estable debido a una alta alcalinidad (Cui, Tang, Liu, Dong, & Xing, 2015).

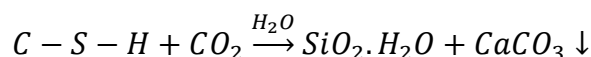
Aunque se ha demostrado que la carbonatación disminuye la porosidad, debido a la formación de carbonato de calcio, aún no se ha podido cuantificar esta disminución y no están determinados los parámetros de control de este efecto. En la actualidad existen técnicas que son capaces de dar resultados que permitan la comprensión del proceso de carbonatación, una de estas técnicas es la difracción de neutrones, en donde los neutrones penetran profundamente en la estructura proporcionando información sobre la muestra (Castellote et al., 2008).

En el proceso de carbonatación, el CO_2 ingresa a través de los poros existentes dentro de la estructura del concreto en donde reacciona con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$, y cuyos productos precipitan luego como CaCO_3 .

Reacción 10.



A medida que los iones Ca^{2+} y OH^- son eliminados de la solución mediante la carbonatación, la Portlandita precipitada, se disuelve progresivamente, sin embargo, la carbonatación implica no sólo la reducción de la Portlandita sino también de otras fases de la pasta del hormigón como el gel C-S-H, mientras que la Calcita (CaCO_3) aumenta constantemente (Castellote et al., 2008).

Reacción 11.

La carbonatación del gel C-S-H produce una descalcificación y una polimerización de los silicatos, llegando a formar con el carbonato cálcico, un gel de sílice hidratado. La portlandita, el gel C-S-H, los aluminatos y los sulfoaluminatos también sufren transformaciones a causa de la presencia del CO₂ (Galán García, 2011).

Se ha investigado que en el interior de la estructura del hormigón, a mayor profundidad el proceso de carbonatación es alto cuando las muestras de concreto se exponen a bajas concentraciones de CO₂, mientras que cuando las muestras son expuestas a altas concentraciones de CO₂, el nivel de carbonatación es bajo (Cui et al., 2015).

Thiery, Villain, Dangla, & Platret, (2007) realizaron estudios utilizando el análisis termogravimétrico (TGA) técnica en la que la masa de la muestra es controlada contra el tiempo, junto con la temperatura en una atmósfera controlada. Esta técnica ofrece la determinación de la composición de material. Se afirma que C-S-H juega un papel en la carbonatación del hormigón. Con el TGA se han realizado estudios utilizando difracción de neutrones aplicado en tiempo real a la carbonatación acelerada demostrando que la etringita también es carbonatada (Castellote et al., 2008).

1.10.5.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE CARBONATACIÓN.

Entre los factores que influyen la velocidad de carbonatación se encuentra la humedad, esto se debe a dos causas; en primer lugar, a la difusión del dióxido de carbono dentro del concreto que se facilita a través de los poros que se encuentran llenos de aire, pero es muy lenta a través de los que se encuentran llenos de agua, por lo que la difusión del CO₂ disminuye con un aumento de la humedad. Otro de los factores que influyen en la velocidad de carbonatación es la temperatura. Al elevar la temperatura aumentara el proceso de carbonatación. La composición del hormigón influye también en la carbonatación, debido a que la permeabilidad tiene una notable influencia en la difusión del CO₂, por lo tanto, una disminución de la relación agua/cemento, disminuye la porosidad del concreto y atenúa la penetración de la carbonatación (Peddeferri et al., 2013).

1.10.5.2 DETERMINACIÓN DE LA CARBONATACIÓN.

La determinación de la carbonatación se realiza mediante el método colorimétrico, basado en la norma UNE-112-011. El espécimen a analizar debe estar seco y libre de polvo, aunque también se puede realizar sobre un orificio en la muestra, que debe estar seco y libre de polvo. El reactivo a utilizar en este método es fenolftaleína al 1% en alcohol etílico. Este no debe aplicarse en cantidades excesivas o sobre superficies mojadas, ya que la disolución con el indicador podría propagarse desde unas zonas a otras y, en el caso de que hubiera coloración, podrían obtenerse resultados erróneos (González & Alloza, nd).

Cuando no se aprecia una buena coloración o es muy débil, debe repetirse el ensayo. Este ensayo consiste en la determinación de la reducción de la alcalinidad en la estructura del concreto, la cual puede ponerse de manifiesto mediante un indicador de pH.

Para realizar la medida de la profundidad de carbonatación, se toma una fracción de espécimen que debe estar recién cortada, seco y libre polvo. La capa del hormigón que se encuentra carbonatada se mantiene incolora ($\text{pH} < 8$), mientras la no-carbonatada se vuelve color rojo-púrpura ($\text{pH} > 9,5$).



Ilustración 21. Medida de la carbonatación en el hormigón.
Fuente: (Renata d'Andréa, 2010).

Existen otras técnicas para la determinación de la carbonatación como el análisis Termogravimétrico (TGA) y el análisis Térmico Diferencial (DTA), cuyo uso conjunto permite analizar cualitativa y cuantitativamente las descomposiciones del carbonato cálcico y de la portlandita. Otros métodos utilizados son: la difracción de rayos X, la espectroscopia de Infrarrojo, la microscopía electrónica de barrido (SEM) y la cromatografía de gases. En la actualidad se están empezando a usar técnicas más avanzadas, como la difracción de neutrones (Galán García, 2011).

1.11 INFLUENCIA DE LA HUMEDAD Y TEMPERATURA SOBRE LOS PROCESOS DE DETERIORO DE LAS TUBERIAS DE HORMIGÓN.

El contenido de agua es necesario para la movilidad de los iones a través de la estructura del hormigón. La siguiente tabla muestra la influencia de la humedad sobre algunos procesos de deterioro del hormigón.

Tabla 2: Influencia de la humedad sobre algunos procesos de deterioro del hormigón.

HUMEDAD RELATIVA	PROCESOS DE DETERIORO.		
	CARBONATACIÓN	ATAQUE POR HELADAS	ATAQUE QUÍMICO
Muy baja (<45%)	1	0	0
Baja (45-65%)	3	0	0
Media (65-85%)	2	0	0
Alta (85-95%)	1	2	1
Saturada (>95%)	0	3	3

Donde:

- 0= no significativo.
- 1=Bajo.
- 2=Medio.
- 3=Alta.

Fuente: (Perepérez, Barbera & Andrade, 1987).

La temperatura es importante en los procesos de deterioro, ya que el incremento provoca una mayor movilidad de las moléculas facilitando el transporte de sustancias; por otro lado, su disminución puede dar lugar a condensaciones que a su vez produce incrementos sobre el contenido de humedad en la estructura de la pared de los tubos (Perepérez, Barbera & Andrade, 1987).

1.12 DURABILIDAD DEL HORMIGÓN.

La durabilidad y estabilidad química de los productos de cemento está relacionada con el contenido libre de cal (hidróxido de calcio) presente en los productos hidratados y la agresividad de los medios circundantes. La presencia de cal libre ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) es una de las principales causas de

deterioro de los productos de cemento, especialmente en los ambientes que contienen sulfatos (Al-Adeeb & Matci, 1984).

Es difícil predecir, la durabilidad de los materiales empleados en su fabricación debido a que están sometidos a diversos factores tales como:

- Terreno.
- Naturaleza variable del clima.
- Geología.
- Propiedades físicas y químicas del fluido que transporta.
- Proceso de elaboración.
- Y los materiales utilizados en su fabricación.

Con este estudio pretenderemos entonces observar, entender y prever los efectos ocasionado en las estructuras de las tuberías de hormigón cuando son expuestas a los ambientes más hostiles de pH, y al mismo tratar de poder cuantificar estos daños.

Por todo lo expuesto podemos notar que no existe un estudio completo que nos permita comprender como estos compuestos químicos reaccionan con los constituyentes del hormigón ya sea de manera benéfica o perjudicial. Por esto nos enfocaremos en demostrar que en pH elevados existe una reacción del medio con la composición química de las tuberías del hormigón y trataremos de ver el resultado de esta interacción en un lapso de tiempo de 3 meses.

2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.

2.1 OBJETIVO GENERAL.

El objetivo del presente trabajo es estudiar el comportamiento de las tuberías de hormigón sometidas a soluciones con pH alcalino elevado (compuesta por diferentes tipos de sales) y sus efectos en la estructura física, como química.

Evaluar las propiedades físicas y químicas de las tuberías de hormigón, expuestas a agua con un pH alcalino.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Preparar soluciones alcalinas que sean representativas de los sistemas de estudio, en las cuales son utilizadas probetas rectangulares de tuberías de hormigón, sometidas a soluciones con pH 9, 10 y 13.
- Evaluar las propiedades físicas en probetas rectangulares de tuberías de hormigón, realizando pruebas de resistencia a la flexión.
- Evaluar las propiedades químicas en probetas de tuberías de hormigón, realizando pruebas de determinación de cloruros, sulfatos y avance de la carbonatación.
- Analizar el área específica en relación a los poros existentes en las estructuras de la probeta proveniente de las tuberías de hormigón, por el método BET (Técnica para la caracterización de los sólidos acrónimo derivado por los autores Brunauer, Emmett y Teller), este parámetro expresa la relación del área total del catalizador y el peso de la misma, se expresa en m^2/g y posee como principio la absorción física de un gas inerte como el nitrógeno (N_2) para variar la relación entre la presión parcial de nitrógeno y su presión de vapor a la temperatura de nitrógeno líquido (Brunauer, S., P. H. Emmett & Tell, E., 1930).

3. PARTE EXPERIMENTAL.

3.1 MATERIALES.

- Flexómetro.
- Amoladora.
- Gafas de protección.
- Mascarilla.
- Luna de reloj.
- Probeta de 1000 mL.
- Tamices # 30, # 10 y # 5 (600µm, 2,00mm y 4,00mm) de la serie ASTM (American Society of Testing Materials).
- Espátula.
- Cepillo de acero.
- Balones de aforo de 100 mL.
- Varilla de vidrio.
- Vasos de precipitación.
- Papel filtro.
- Embudo de filtración.

3.2 EQUIPOS.

- pH metro: ORION RESEARCH, Ion Analyzer Model 407/A
- Nova 2200e Surface Area & Pore Size Analyzer.
- Balanza de precisión: Marca: SARTORIUS, modelo: CP224S, serie:16306768, capacidad Max: 220 gr, exactitud=0,1mg.
- Equipo de ensayos universales: Tinius Olsen, model SRS Display.
- Espectrofotómetro GENESYS™ 20: Ancho de banda espectral: ≤8 nm, fuente de luz: tungsteno-halógeno, rango: 325 a 1100 nm, exactitud: ±2.0 nm, rango fotométrico: -0.1 2.5A; 0–125%T, 0–1999C.
- Horno.
- Plancha eléctrica.
- Termómetro.

3.3 METODOLOGIA.

La metodología empleada en el presente trabajo constas de cinco partes

3.3.1 OBTENCIÓN DE LAS PROBETAS RECTANGULARES DE LOS TUBOS DE HORMIGÓN.

Para la obtención de las probetas se empleó tubos de hormigón de la empresa “PRE FABRICADOS DEL AUSTRO”. Los tubos utilizados tenían

las siguientes características.

Tabla 3: Característica de la tubería de hormigón.

DESCRIPCIÓN	Dimensión (m)
Diámetro exterior	0,40
Diámetro interior	0,35
Longitud	1,00

Fuente: (Propia).

Con el uso de la amoladora se cortó 16 probetas rectangulares de los tubos de hormigón, teniendo cuidado que no se produzca vibraciones fuertes que puede provocar la ruptura de la muestra. Las dimensiones de las muestras fueron de 4cmx4cm de sección rectangular y 60cm de largo.



Ilustración 22: Proceso extracción de probetas del tubo de hormigón.

Fuente: (Propia).



Ilustración 23: Probetas extraídas del tubo de hormigón.

Fuente: Propia.

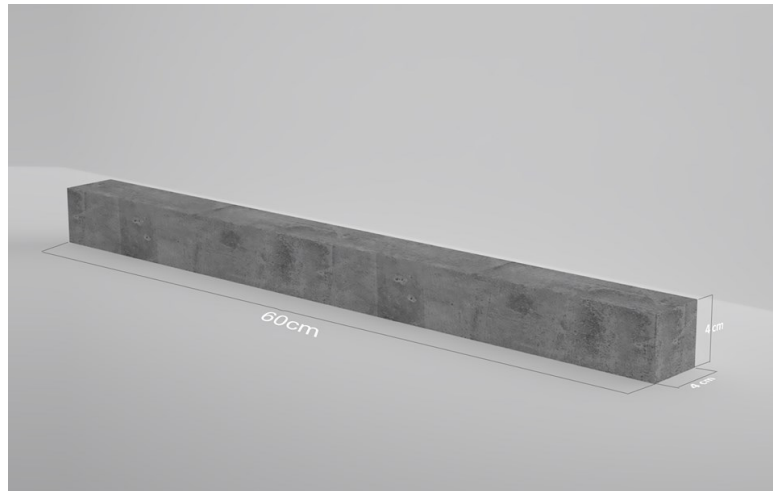


Ilustración 24: Dimensiones de las probetas.

Fuente: Propia.

3.3.2 PREPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES CON pH ALCALINO ELEVADO.

Para la preparación de las soluciones nos basaremos en la bibliografía descrita por Pell & Ljunggren, en la cual las muestras serán sometidas a agua con pH alcalino en un lapso de tiempo de 90 días.

- Se etiquetó 3 recipientes plásticos con los siguientes nombres pH 9, pH 10, pH 13.
- A cada recipiente se adicionó 15000 mL de agua potable.
- Se pesó y adicionó a cada recipiente: 3,975 g de carbonato ácido de sodio (NaHCO_3), 3,45 g de urea, 0,825 g de cloruro de sodio (NaCl), 0,3975 g de cloruro de calcio (CaCl_2), 0,2625 g de sulfato de magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), 6 g de sulfato de sodio decahidratado ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), 0,027525 g de fosfato ácido de potasio trihidratado ($\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$).
- Se utilizó hidróxido de sodio y se añadió directamente para modificar el pH a 9, 10 y 13, respectivamente.



Ilustración 25: Solución alcalina de pH 9.

Fuente: Propia.

3.3.3 INMERSIÓN DE LAS PROBETAS DE LAS TUBERIAS DE HORMIGÓN EN LAS SOLUCIONES ALCALINAS.

Se sumergieron 6 probetas a cada solución anteriormente preparadas. Cada 30 días se realizó una evaluación fisicoquímica de cada probeta, así como también se realizó un control continuo de solución alcalina, para asegurarse que se encuentre en el pH establecido.

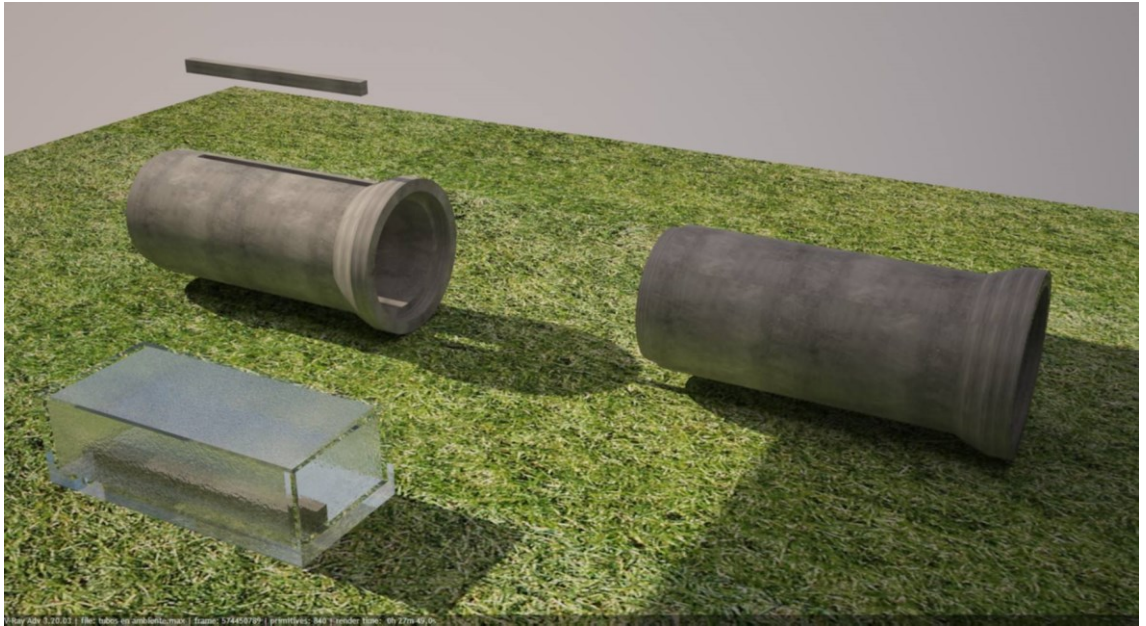


Ilustración 25: Procedimiento de selección, corte e inmersión de la probeta rectangular en la cubeta de agua con pH alcalino elevado.

Fuente: Propia.

3.3.4 EVALUACIÓN FISICOQUÍMICA DE LAS PROBETAS DE TUBERÍAS DE HORMIGÓN.

Este estudio fue realizado en la universidad de Cuenca en la facultad de Ciencias Químicas, laboratorio de análisis de suelos y bromatología, así como en la facultad de Ingeniería, laboratorio de suelos.

3.3.4.1 EVALUACIÓN FÍSICA DE LAS PROBETAS RECTANGULARES DE TUBERÍAS DE HORMIGÓN.

3.3.4.1.1 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN.

Estos ensayos fueron realizados en la facultad de Ingeniería en el laboratorio de suelos.

La metodología planteada se encuentra adaptada a la norma NTE INEN-ISO 10545-4 Primera edición 2014-01 con ciertas modificaciones que se especifican a continuación.

Secar la muestra en el horno a 110°C durante 24h.



Ilustración 26: Horno utilizado para el secado de las probetas.
Fuente: (Propia).



Ilustración 27: Secado de las probetas.
Fuente: (Propia).



Ilustración 28: *Probeta sometida a resistencia a la flexión.*
Fuente: (Propia).

3.3.4.1.2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

Este ensayo permitirá determinar la resistencia a la compresión de tuberías de hormigón con diámetros de 200, 300 y 400mm.

El ensayo se realizó en tuberías de hormigón simple (sin refuerzo) con las siguientes características que se detallan a continuación:

Tabla 4: Característica de las tuberías simples a analizar.

	Diámetro interior (mm).	Longitud tubo (mm).	Espesor de la pared (mm).
Espécimen 1	200	900	100
Espécimen 2	300	900	100
Espécimen 3	400	800	100

Fuente: (Propia.)



Ilustración 26: Tuberías de hormigón que serán sometidas a ensayo de compresión. .

Fuente: (Propia).

La metodología utilizada se basa en las normas ASTM C497 M y NTE INEN 1587.

1. Se coloca la tubería sobre un apoyo en toda su longitud el cual tiene un canaleta con dos franjas de apoyo sobre una base rígida.



Ilustración 27: Tubería de hormigón sometida a ensayo de compresión. .
Fuente: (Propia).

2. En el extremo superior se coloca otro apoyo en toda la longitud de la tubería.
3. Por medio de una viga de carga rígida y de un gato hidráulico se aplica la carga al espécimen hasta generar una grieta.

3.3.4.1.3 DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD.

1. Se pesó una cantidad de 10 g de muestra de cemento finamente triturada y se pasó por un tamiz # 5 de la serie ASTM.
2. Se realizó un desgasificado para eliminar cualquier gas o sólido absorbido en los poros durante 3 horas aplicando una temperatura de 300°C, con lo cual se obtuvo un peso inicial de muestra de para el análisis de 0,1112 g.
3. Posteriormente se obtuvieron los datos de la isoterma de adsorción-desorción, donde se escogieron los datos que van desde 0,05 hasta 0,35 puntos para adsorción, debido a que en este rango es aplicable la ecuación de BET. Para corroborar los resultados los resultados presentados fueron sometidos a un test de coherencia que constó de tres etapas:
 - a) **Evolución del volumen adsorbido con P/P_0 :** Para aprobar esta etapa, Q_{ads} debe mostrar una tendencia incremental a medida que aumenta P/P_0 .
 - b) **Determinación del valor de P/P_0 estadístico de monocapa:** Este resultado debe estar comprendido entre el valor máximo y mínimo de P/P_0 en el rango de datos seleccionado.

- c) **Prueba de Rouquerol:** El valor de P/P_0 estadístico de monocapa no debe presentar una desviación mayor al 10% con respecto al valor calculado de P/P_0 de monocapa experimental en el rango de datos seleccionado.

3.3.4.2 EVALUACIÓN QUÍMICA DE LAS PROBETAS DE TUBERÍAS DE HORMIGÓN.

En este estudio se realizará la evaluación de cloruros, sulfatos y avance del fenómeno de carbonatación.

PROCEDIMIENTO:

1. Con el uso de un cepillo de acero se procede a realizar la extracción de una primera capa de la probeta que corresponde a una profundidad de 3mm. Posteriormente se procede a extraer muestra de una segunda capa a una profundidad de 6mm y finalmente a una profundidad de 9mm.
2. Se realiza el proceso de tamizado.
3. Finalmente se recolecta la muestra en recipientes de vidrios.



Ilustración 31: Muestras extraídas de probetas a diferentes profundidades.

Fuente: (Propia).

3.3.4.2.1 ANÁLISIS DE SULFATOS.

La determinación de sulfatos se realizará mediante espectrofotometría de absorción en UV-vis basadas en la norma ASTM C1580 (Performance & Spectrophotometers, 2010).

CALIBRACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN DEL ESPECTROFOTÓMETRO.

1. Se prepara un blanco con agua desionizada.

2. Luego se toma 8 balones aforados de 100mL y se agrega respectivamente 0, 2, 5, 10, 15, 20, 30 y 40 mL de solución estándar o stock de sulfato (0,100 mg/L) y se afora con agua destilada.
3. La solución estándar o stock se prepara pesando 0,1479 g de sulfato de sodio anhídrido, y posteriormente diluyendo y aforando a 1 L.

PREPARACIÓN DE SOLUCIÓN ACONDICIONADORA.

Se mezcla 30 mL de ácido clorhídrico ($d = 1,19 \text{ g/cm}^3$), 300 mL de agua destilada, 100 mL de etanol al 95% o isopropanol y 75 g de cloruro sódico, posteriormente se añade 50 mL de glicerina.

PROCEDIMIENTO.

1. La muestra debe estar desecada durante 18 a 24 h a 110°C .
2. Pasar la muestra por un tamiz de 600 μm .
3. Pesar 30 gramos.
4. Agregar en un vaso de 250 mL y añadir agua destilada hasta los 250 mL.
5. Agitar y mezclar bien.
6. Filtrar las muestras (repetir en caso de ser muy turbio).
7. Neutralizar las soluciones filtradas hasta obtener un pH de 7 ± 1 , ya sea utilizando HCl 0,1 N o NaOH 0,1 N.
8. Se toma una alícuota de 10mL del filtrado, posteriormente se coloca en balones de aforo de 100mL y se afora con agua desionizada.
9. Se vierte los 100mL del aforado en vasos de precipitación de 250mL, a cada solución se adiciona 5mL de solución acondicionadora y 0,3g de cloruro de bario ($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).
10. Se agita y finalmente se ubica la muestra en la celda a 420nm.

3.3.4.2.2 ANÁLISIS DE CLORUROS.

Este método se basa en la preparación de patrones de NaCl con concentración de iones cloruro.

PREPARACIÓN DE LA MUESTRA Y DETERMINACIÓN.

1. Se pesó 2g de muestra pasada por un tamiz #10, se atacó con 25mL de HNO_3 (P.A) diluido (1:1) y 50mL de agua destilada.



Ilustración 28: Pesado de la muestra.
Fuente: (Propia).



Ilustración 29: Ataque de la muestra con ácido nítrico.
Fuente: (Propia).

2. La mezcla se dejó hervir durante 10min.



Ilustración 30: Calentamiento de la muestra a ebullición.
Fuente: (Propia).

3. Posteriormente se procedió a filtrar la muestra y lavar el papel filtro con agua destilada hasta obtener un volumen de aforo de 250mL.



Ilustración 31: Proceso de filtrado de las muestras.
Fuente: (Propia).

4. Se comprueba en las últimas gotas de lavados ausencia de cloruros (método cualitativo con una solución de nitrato de plata).

PREPARACIÓN DE SOLUCIONES PATRÓN.

1. Se pesó 0,6g de cloruro de sodio (P.A) y se aforo a 1000mL, con la que se obtuvo solución denominada A.
2. A partir de la solución se obtuvieron las siguientes disoluciones.

Tabla 5: Soluciones patrón de cloruro de sodio.

Denominación	Preparación			Concentración obtenida	
	Solución A (mL).	HNO ₃ conc. (mL).	Vol. de aforo (mL).	g/L	ppm
B	100	40	1000	0,0360	36,0
E	15	40	1000	0,0054	5,4
F	10	40	1000	0,0036	3,6

Fuente: (Moreno & Esteye).

A partir de la disolución **B** se preparó las siguientes disoluciones.

Tabla 6: Preparación de soluciones patrón de cloruro de sodio.

Denominación	Preparación			Concentración obtenida	
	Solución B (mL).	HNO ₃ conc. (mL).	Vol. de aforo (mL).	g/L	ppm
G	50	38	1000	0,0018	1,8
H	25	39	1000	0,0009	0,9

Fuente: (Moreno & Esteye).

**Ilustración 32:** Soluciones patrón con nitrato de plata.

Fuente: (Propia).

- Se preparó una disolución en blanco, añadiendo 40 mL de ácido nítrico concentrado y agua destilada (disolución I).
- Se pipeteo 100 mL de las muestras obtenidas del filtrado anterior y de las disoluciones patrón E, F, G, H, e I y se colocó

en vasos de precipitación de 250mL. A continuación, se añadió gota a gota 10 mL de disolución de AgNO_3 0,1 N agitando ligeramente.



Ilustración 33: *Soluciones patrón con nitrato de plata.*
Fuente: (Propia).

5. Posteriormente se calentó las soluciones a 50°C durante 20 minutos y se dejó enfriar durante 15 minutos a la temperatura ambiente en ausencia de la luz.
6. Finalmente se procedió a medir la turbidez a 450 nm ajustando a cero con la muestra en blanco.
7. Con los resultados obtenidos se procede a realizar la curva de calibración.

3.3.4.2.3 DETERMINACIÓN DEL AVANCE DEL FENÓMENO DE LA CARBONATACIÓN.

El avance del fenómeno de carbonatación se realiza mediante el método colorimétrico utilizando una solución alcohólica de fenolftaleína (Aguirre-Guerrero et al., 2016).

Los especímenes utilizados fueron de dimensiones 60cm x 4cm x 4cm, los cuales fueron sumergidos en las soluciones alcalinas durante un periodo de 3 meses. Cada mes se realizó una evaluación del avance del fenómeno de carbonatación.

PROCEDIMIENTO:

1. Extraer las probetas de las soluciones alcalinas.
2. Exponer las probetas a un ambiente cubierto de la lluvia durante 30 días
3. Romper en dos la muestra a analizar.
4. Retirar todo el polvo de las caras recién fracturadas.
5. Aplicar inmediatamente la disolución de fenolftaleína.



Ilustración 34: Probetas aplicadas solución de fenolftaleína.

Fuente: (Propia).

6. Luego de pocos minutos se produce coloración en las diferentes zonas.
7. Con un calibrador se mide la 'profundidad de carbonatación.

La capa de la muestra que se encuentra carbonatada se mantiene incolora ($\text{pH} < 8$), mientras la no-carbonatada se torna de un color rojo-púrpura ($\text{pH} > 9,5$) (Galán García, 2011).

4. RESULTADOS

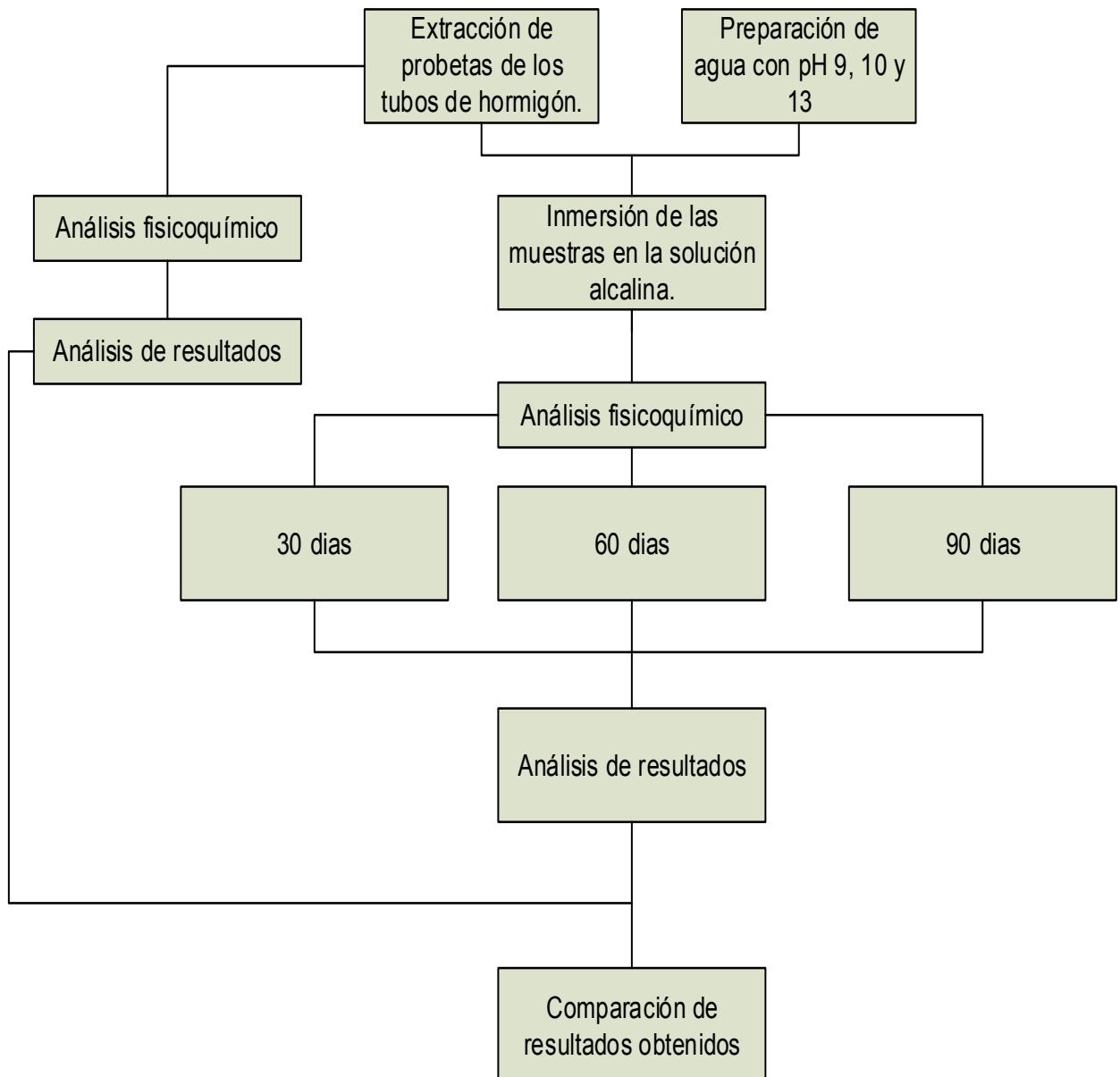


Ilustración 35: Diagrama de evaluación fisicoquímica de probetas sometidas a agua con pH alcalino.

Fuente: (Propia).

4.1 ANÁLISIS FÍSICO.

4.1.1 ANALISIS DE RESULTADOS DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN EN LAS PROBETAS.

En la Tabla 7, se presentan los valores medios de resistencia a la flexión de las probetas, a los 0 días de exposición en la solución alcalina.

Tabla 7: Valores de resistencia a flexión obtenidos a los 0 de días exposición.

	Unidades	Probeta 1	Probeta 2	Promedio
Fuerza (F)	N	236,159	234,417	235,288
Longitud (L)	m	0,4	0,4	0,4
Base (b)	m	0,04	0,04	0,04
Altura (h)	m	0,04	0,04	0,04

Fuente: (Propia).

$$R = \frac{3FL}{2bh^2} = \frac{3S}{2h^2} \quad (1)$$

$$R = \frac{3(235,288)(0,4m)}{2(0,04m)(0,04m)^2} = 2205825 \frac{N}{m^2}$$

$$R = 2,206 \text{MPa}$$

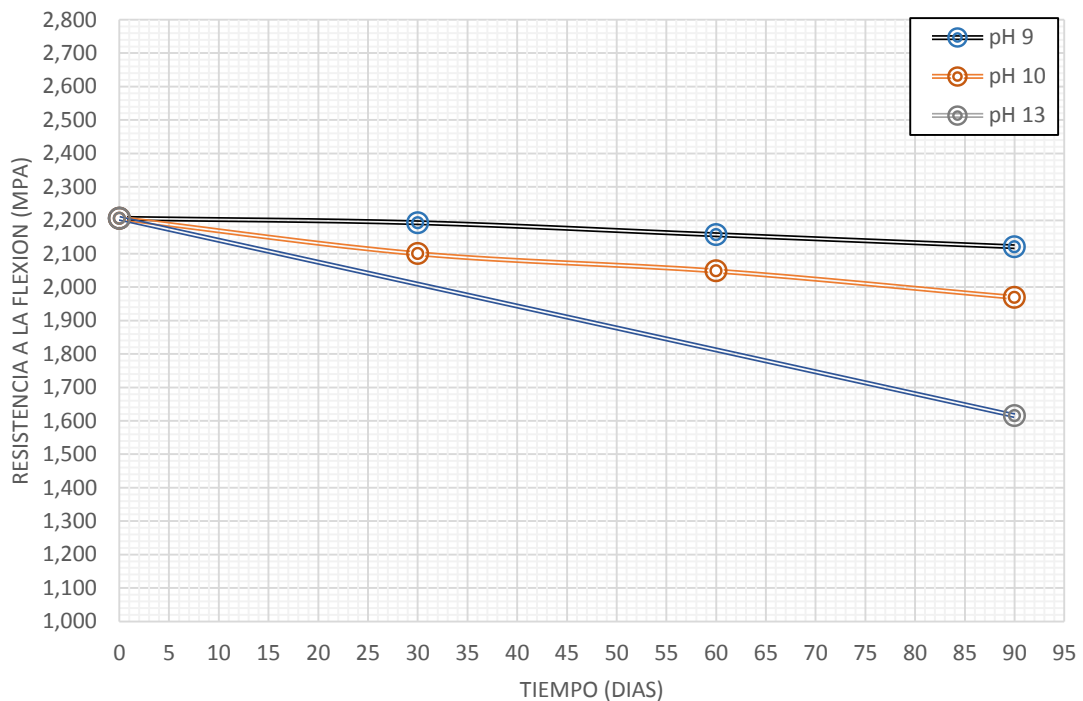
En el **ANEXO 1** se detalla el cálculo de la resistencia a la flexión de cada una de las probetas.

En la **tabla 8**, se presentan los valores obtenidos de la resistencia a la flexión en las probetas expuestas a agua con diferentes valores de pH durante 90 días de exposición.

Tabla 8: Resultados de resistencia a flexión obtenidos a los 0, 30, 60 y 90 de días exposición.

Resistencia a la flexión (MPa).			
pH Tiempo (Días).	9	10	13
0	2,206	2,206	2,206
30	2,193	2,100	-
60	2,157	2,048	-
90	2,121	1,969	1,616

Fuente: (Propia).



Grafica 1: Resistencia a la flexión expuesta en agua con diferentes valores de pH. Fuente: (Propia).

En la **gráfica 1** las probetas sometidas a soluciones con pH 9 se observa una importante disminución de la resistencia, comparándola con la probeta de referencia, se puede apreciar que existe una caída del 0,60% en los 30 primeros días de exposición, posteriormente continúa disminuyendo, hasta obtener una caída del 3,85% a los 90 días de exposición en la solución con pH 9. En cuanto a las probetas sometidas a la solución con pH 10, se aprecia que existe una mayor caída de la

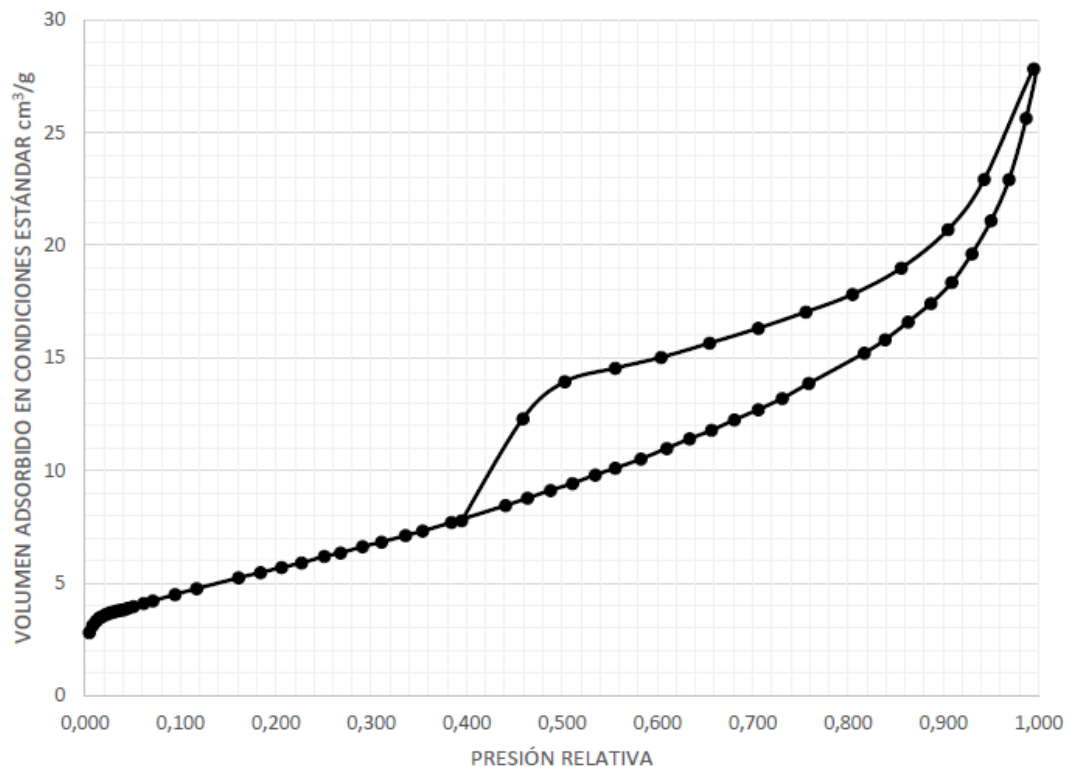
resistencia a la flexión, en comparación con aquellas muestras sometidas a solución de pH 9, obteniéndose así una caída del 10,72% a los 90 días de exposición.

Las probetas que se encontraban expuestas en la solución con pH 13, hubo una caída brusca en la resistencia a la flexión del 26,76 %.

En la **tabla 8** se puede apreciar que la resistencia mecánica de cada espécimen analizado disminuye conforme aumenta el pH.

4.1.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA POROSIDAD.

El método de ensayo utilizado para la determinación de la porosidad fue el de BET, el cual se aplicó a una muestra de tubo de hormigón sin estar expuesto a ningún agente agresivo.



Grafica 2: Isoterma de adsorción-desorción del cemento. **Fuente:** Laboratorio de Ingeniería de reactores y Catálisis de la Universidad de Cuenca.

En la **gráfica 2** se muestra la isoterma de adsorción-desorción del cemento. Esta isoterma es del tipo II. Su histéresis es una combinación de los tipos H3 y H4, lo que indica la presencia de poros en forma de hojas o ranuras. Los datos de esta isoterma fueron sometidos a un test de coherencia antes de obtener el área superficial.

En la **Tabla 9** se presentan los datos para el cálculo del área superficial BET. Estos se encuentran dentro del rango de presiones relativas aceptado para el análisis: $0,05 < P/P_0 < 0,35$.

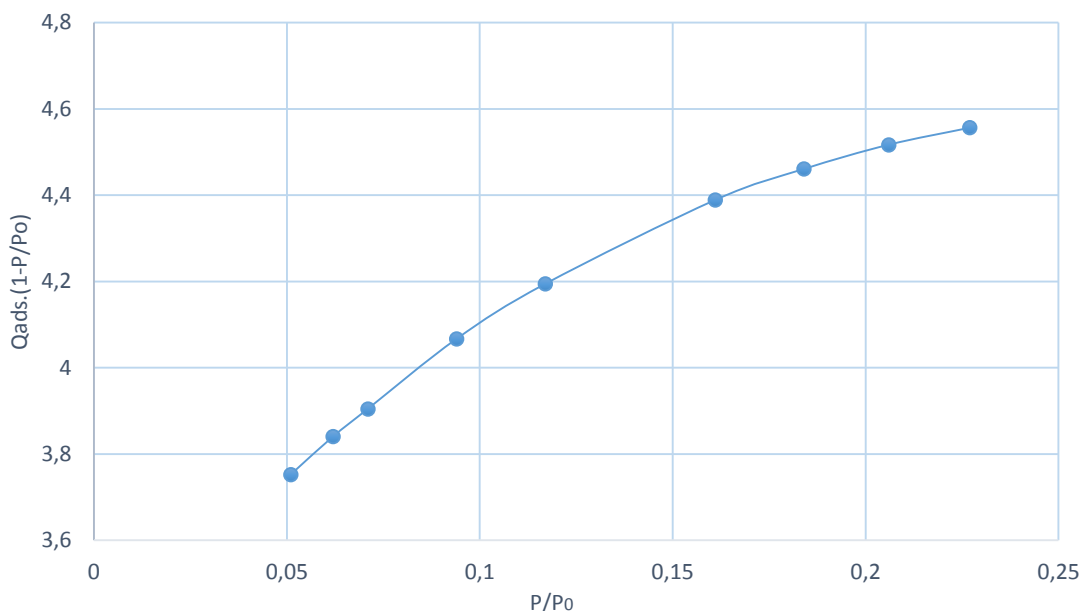
Tabla 9: Datos tomados para la determinación del área superficial.

(P/P_0)	$Q_{\text{Ads}} (\text{cm}^3/\text{g STP})$	$Q_{\text{ads}}(1-P/P_0)$
0,051	3,9529	3,75248797
0,062	4,0926	3,8409051
0,071	4,2032	3,9047728
0,094	4,4901	4,06713258
0,117	4,7504	4,1946032
0,161	5,231	4,388809
0,184	5,4665	4,460664
0,206	5,6888	4,5169072
0,227	5,8943	4,5562939

Fuente: Laboratorio de Ingeniería de reactores y Catálisis de la Universidad de Cuenca.

En base a estos datos, se realizó el test de coherencia:

a) EVOLUCIÓN DEL VOLUMEN ADSORBIDO CON P/P_0 .



Grafica 3: Volumen adsorbido con P/P_0 .

Fuente: Laboratorio de Ingeniería de reactores y Catálisis de la Universidad de Cuenca.

En la **Gráfica 3** se muestra que el volumen adsorbido presenta una tendencia creciente, por lo cual se considera superada esta etapa.

b) DETERMINACIÓN DEL VALOR DE P/P_0 ESTADÍSTICO DE MONOCAPA.

$$C = 58,26$$

Gamme de P/P_0

$$\text{Min.} = 0,0507$$

$$\text{Max.} = 0,227000$$

$$(P/P_0)_{\text{mono}} = 1/(C^{1/2}+1) = 0,1158$$

El valor de la constante C debe estar entre 5 y 300. En este caso C tiene un valor de 58,26 lo que se considera correcto. También el valor de P/P_0 estadístico de monocapa se encuentra entre el valor inicial y final de los datos, por lo cual se considera superada esta etapa.

c) PRUEBA DE ROUQUEROL.

$$V_{\text{mono}} = 4,802072586 \text{ cm}^3/\text{g STP}$$

$$C = 58,264$$

$$(P/P_0)_{\text{mono}} = 0,1134$$

$(P/P_0)_{\text{mono}}$ ESTADÍSTICA SEGÚN ROUQUEROL.

$$(P/P_0)_{\text{mono}} = 1/(C^{1/2}+1) = 0,1158$$

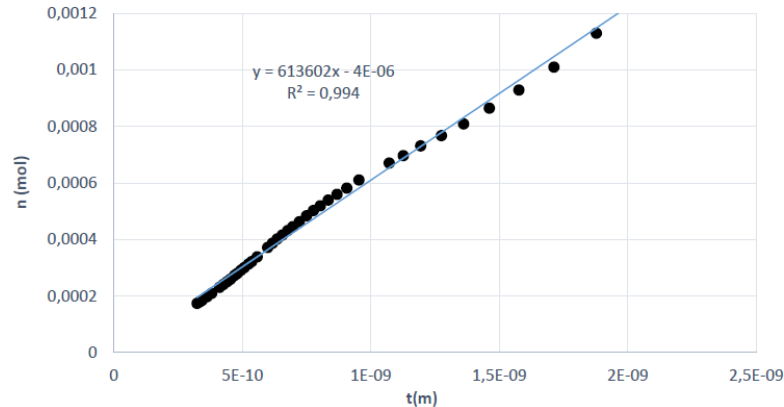
DESVIACIÓN ENTRE LOS VALORES.

$$(P/P_0)_{\text{mono}} = 2,2\%$$

Como se observa en los cálculos, el valor de la desviación entre los valores es menor al 10%, por lo cual se considera aprobada esta etapa. Con estos resultados, el área superficial calculada fue de $20,89 \text{ m}^2/\text{g}$.

DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN MICROPOROSO

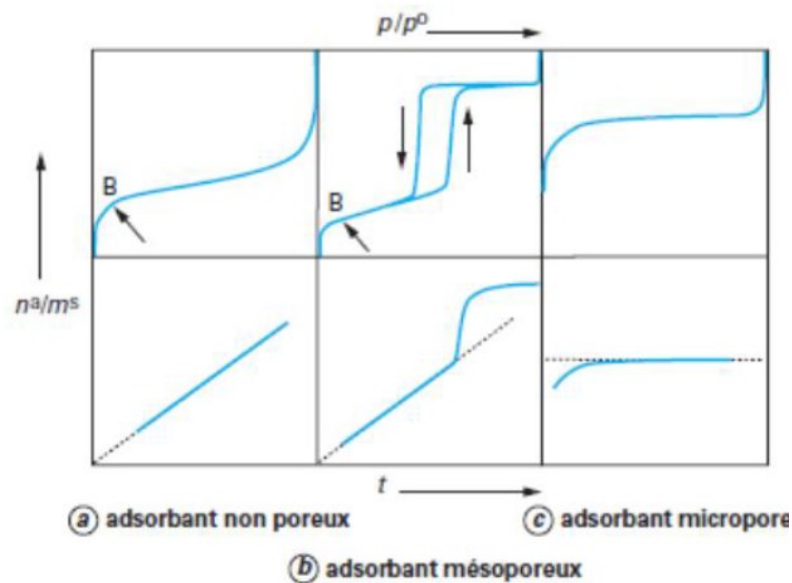
Para esto, se recurrirá al método del t-plot. A continuación, se presentan las gráficas calculadas con el método antes descrito, siendo el espesor de capa determinada con la ecuación de Harkins y Jura:



Grafica 4: t-plot para el cemento. **Fuente:** Laboratorio de Ingeniería de reactores y Catálisis de la Universidad de Cuenca.

Como puede observarse en la **gráfica 4**, no existe presencia de plateau. Por tanto, no existe microporosidad presente en el sólido analizado. Para confirmar esto, se calculó el área superficial externa empleando la pendiente de la ecuación de la recta de regresión. Se obtuvo un valor de $20,19 \text{ m}^2/\text{g}$, cercano al valor obtenido anteriormente. Se reconoce que el sólido estaría conformado por meso y macroporos, para los cuales el área superficial externa es igual al área superficial obtenida mediante el método BET.

Para confirmar si existen meso o macroporos, se comparará el t-plot de la **Gráfica 4** con los modelos de De Boer:



Grafica 5: Modelos de t-plot de De Boer.

Fuente: Laboratorio de Ingeniería de reactores y Catálisis de la Universidad de Cuenca.

Como se muestra en la gráfica 5, el t-plot del cemento corresponde a un sólido no poroso (en cuanto se refiere a la presencia de micro y mesoporos). Por tanto, se estima que el sólido analizado está conformado exclusivamente por macroporos.

Al realizar el análisis de la porosidad en un espécimen sin estar expuesto a ningún medio agresivo mediante el método de BET, pudo constatar que la muestra estaba formada exclusivamente por macroporos, los cuales permiten una mayor facilidad de ingresos las sustancias agresivas en el interior de la estructura. Las reacciones producidas de intercambio entre fluidos agresivos y componentes del hormigón, produce una remoción de los iones de calcio como productos solubles, reacciones de formación la etringita, todos estos efectos producen un incremento en la porosidad, en la permeabilidad, y pérdida de resistencia y rigidez en la tubería (Anónimo, n.d).

4.2 ANÁLISIS QUÍMICO.

4.2.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS SULFATOS.

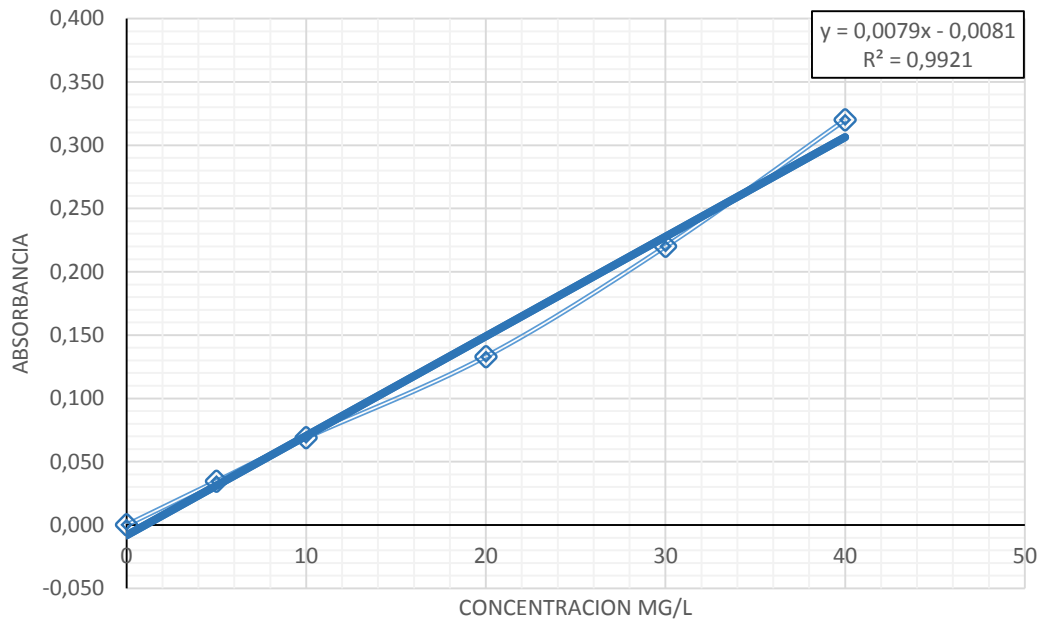
4.2.1.1 ELABORACIÓN DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN.

Para la elaboración de la curva de calibración se realizaron los análisis por duplicado, obteniéndose los siguientes resultados los cuales no tuvieron que diferir más del 5%, el uno del otro.

Tabla 10: Valores de las absorbancias de los patrones para los sulfatos.

CONCENTRACIÓN (mg/L)	ABSORBANCIA .		PROMEDIO.
	LECTURA 1	LECTURA 2	
BLANCO	0	0	0,000
5	0,033	0,036	0,035
10	0,070	0,068	0,069
20	0,130	0,136	0,133
30	0,218	0,222	0,220
40	0,320	0,320	0,320

Fuente: (Propia).



Grafica 6: Curva de calibración para los sulfatos.
Fuente: (Propia).

4.2.1.2 ANÁLISIS DE LA MUESTRA.

Para determinar la concentración de sulfatos en cada una de las muestras se hace el uso de la ecuación obtenida en la curva de calibración mediante la regresión lineal.

4.2.1.3 RESULTADOS DE LAS ABSORBANCIAS DE LOS SULFATOS EN LAS PROBETAS DE REFERENCIA.

Tabla 11: Valores de las absorbancias de la muestra a una profundidad de 3mm.

	ABSORBANCIA.		
	LECTURA 1	LECTURA 2	PROMEDIO.
MUESTRA.	0,333	0,330	0,332

Fuente: (Propia).

$$x = \frac{y + 0,0081}{0,0079}$$

$$x = \frac{0,332 + 0,0081}{0,0079}$$

$$x = 43,210 \text{ mg/L}$$

Para determinar el porcentaje en peso de sulfatos ($\% SO_4^{=}$), se hace el uso de la siguiente formula.

$$P = \frac{2.5 * M}{A * W} \quad (2)$$

Donde:

P= $\% SO_4^{=}$ en la muestra.

M= mg/L de $SO_4^{=}$ determinado en la curva de calibración.

A= masa de la muestra en g.

W= volumen de la alícuota en mL.

$$P = \frac{2.5 * 43,210 \text{ mg/L}}{10\text{mL} * 30\text{g}}$$

$$P = 0,360 \%$$

A continuación, se detalla los resultados de los análisis cuantitativos de los iones sulfatos en las probetas sometidas a diferentes valores de pH, obtenidos según la metodología 3.3.4.2.1. En el **ANEXO 3** se detalla el cálculo para determinación del porcentaje de sulfatos en cada uno de los especímenes correspondientes.

Tabla 12: Resultados del porcentaje de sulfatos en las probetas expuestas a agua con pH 9.

Tiempo (Días). Profundidad (mm).	Cantidad de sulfatos (%).			
	0	30	60	90
0-3	0,370	0,467	0,563	0,675
3-6	0,330	0,324	0,331	0,352
6-9	0,326	0,325	0,333	0,330

Fuente: (Propia).

Tabla 13: Valores del porcentaje de sulfatos en las probetas expuestas a agua con pH 10.

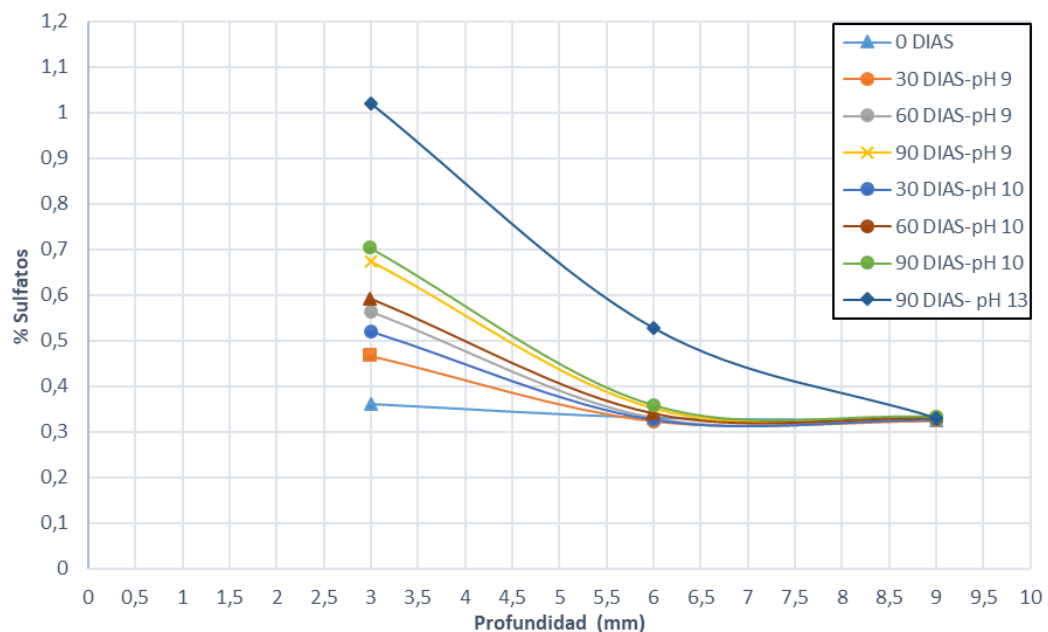
Tiempo (Días). Profundidad (mm).	Cantidad de sulfatos (%).			
	0	30	60	90
0-3	0,360	0,521	0,592	0,703
3-6	0,330	0,328	0,340	0,358
6-9	0,326	0,328	0,330	0,333

Fuente: (Propia).

Tabla 14: Valores del porcentaje de sulfatos en las probetas expuestas a agua con pH 13.

Tiempo (Días). Profundidad (mm).	Cantidad de sulfatos (%).	
	0	90
0-3	0,360	1,021
3-6	0,330	0,528
6-9	0,326	0,330

Fuente: (Propia).



Gráfica 7: Cambios en el contenido de sulfatos a diferentes profundidades expuestas a una solución con pH 9, 10 y 13. Fuente: (Propia).

Como se puede apreciar en la **Gráfica 7**, la penetración de sulfatos es mayor en el caso de exposición de las probetas en agua con pH de 13, prácticamente el doble en comparación con las sometidas en agua con pH 9 y 10. Por otra lado en la gráfica 6 también muestra que el contenido de iones sulfato de 0 a 3mm es mayor, pero posteriormente cae de 3 a 6 mm y se mantiene constante de 6-9mm de profundidad, para el caso de las probetas expuestas al agua con pH 9 y 10, a 90 días, además los valores de la concentración a 30 y 60 días de exposición no representan una variación muy grande. Para el caso de las probetas expuestas a la solución con pH 13, el contenido de iones sulfato de 0-3mm es mayor, pero posteriormente cae de 3-6 mm y de 6-9mm de profundidad se mantiene constante su valor.

A partir de la gráfica 6, se puede constatar que el porcentaje total de sulfatos en la probeta a una profundidad de 0-3 mm sometida en un lapso de 90 días y un pH de 13, obteniéndose un valor de 1,021%, el más alto porcentaje de sulfatos en estas condiciones, afirmando de esta manera que se produjo una mayor reacción entre los constituyentes químicos del espécimen de tubo de hormigón, de igual manera los cloruros, los sulfatos que se presentan en las soluciones alcalinas, tienden a penetrar en la red porosa de la probeta (constituida principalmente por macroporos) haciendo más fácil esta difusión, y ayudado básicamente por la diferencia de concentraciones que se tiene (D'Andrea, 2010).

Con respecto a las probetas analizadas provenientes de la cubeta de agua con pH de 9 el análisis de sulfatos inicial fue de 0,37 % en la probeta y al cabo de 90 días este porcentaje aumento hasta 0,66% de sulfatos, no se obtuvieron mayores cambios con los análisis de sulfatos en la probeta proveniente de la cubeta de agua con un pH de 10, aumentado el porcentaje de sulfatos de 0,36% hasta 0,7%. Con esto se puede apreciar una relación directa entre la cantidad de sulfatos existentes en la probeta con su capacidad de resistencia a la flexión, ya que al no haber mayor cantidad de sulfatos el debilitamiento en la resistencia a la flexión tampoco fue notorio, debido a que en la probeta de pH 9 se redujo esta capacidad en un porcentaje de 0,60% en los primeros 30 días hasta 3,85 % en los 90 días. Mientras que en la probeta sometida a un pH de 10 esta de la resistencia a la flexión se redujo de un valor inicial de 4,80% en los 30 primeros días hasta una disminución de 10,72 %, se puede mencionar que este comportamiento no es tan grande debido a que podría estar relacionado con la pobre reacción que se tiene de entre los componentes de la probeta de hormigón y las cantidades de agentes químicos que se encuentran en el medio, (Aguirre & Mejía de Gutierrez, 2013).

El resultado del análisis de la resistencia a la flexión en la probeta proveniente de la solución con pH 13 muestra un debilitamiento del 26,76% muy mayor en comparación a la probeta no expuesta a ningún ambiente alcalino. También este efecto es favorecido por la formación de TSA que es una sal compleja que produce daños de expansión, pero no existe una cuantificación al respecto, ya que según diferentes autores dependerá más de factores físicos y químicos para ser más claros sus efectos (Rahman et al., 2014). Según el Hill et al., a pH superiores de 10,5 se forma la TSA, por lo que se corroboraría que este compuesto junto al etringita son los culpables de que a pH 13 existan mayor cantidad de sulfatos y produzca un notable deterioro en la capacidad de la resistencia a la flexión, demostrado en las gráficas 1 y 6.

4.2.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS CLORUROS

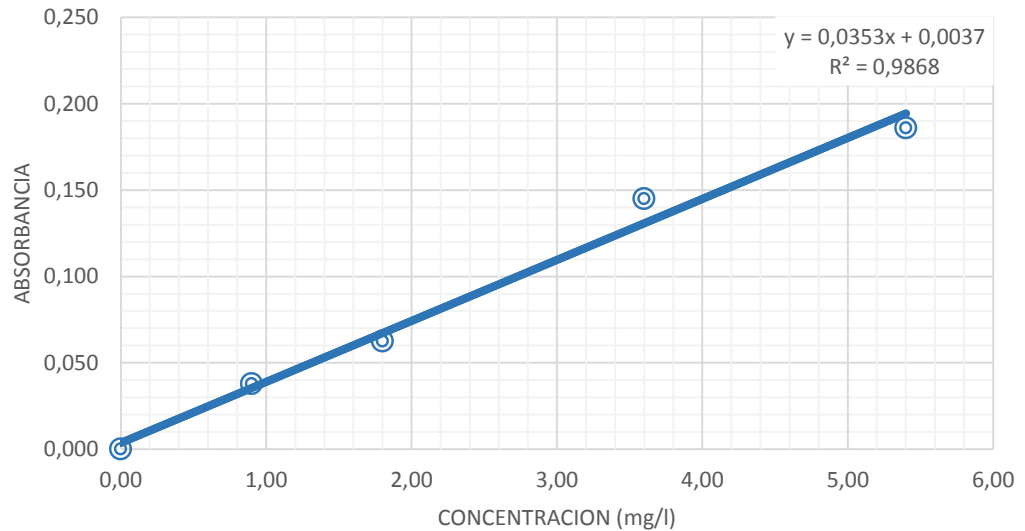
4.2.2.1 ELABORACIÓN DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN.

Para la elaboración de la curva de calibración se realizaron los análisis por duplicado, obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla 15: Valores de las absorbancias de los patrones de NaCl.

CONCENTRACIÓN (mg/L).	ABSORBANCIA.		PROMEDIO.
	LECTURA 1	LECTURA 2	
BLANCO	0	0	0
0,90	0,035	0,041	0,038
1,80	0,060	0,065	0,063
3,60	0,150	0,140	0,145
5,40	0,190	0,182	0,186

Fuente: (Propia).



Grafica 8: Curva de calibración para los cloruros.

Fuente: (Propia).

Para determinar la concentración en mg/L de cloruros en la muestra se hace uso la ecuación obtenida en la curva de calibración mediante la regresión lineal.

En el **ANEXO 4** se detalla el cálculo para determinación del porcentaje de cloruros en cada uno de los especímenes correspondientes.

4.2.2.2 VALORES DE LAS ABSORBANCIAS DE LOS CLORUROS EN LA PROBETA DE REFERENCIA.

Tabla 16: Valores de las absorbancias de la muestra a una profundidad de 3mm.

MUESTRA.	ABSORBANCIA.		PROMEDIO.
	LECTURA 1	LECTURA 2	
	0,060	0,068	
			0,064

Fuente: (Propia).

Determinación de la concentración de cloruros en mg/l.

$$x = \frac{y - 0,0037}{0,0353}$$

$$x = \frac{0,064 - 0,0037}{0,0353}$$

$$x = 1,708 \text{ mg/L}$$

Para determinar en porcentaje en peso cloruros en la muestra ($\% \text{Cl}^-$), se hace el uso de la siguiente formula.

$$\% \text{Cl}^- = C \times \frac{V}{P} \times 100 \quad (3)$$

Donde:

C= concentración de cloruros en g/L, determinado en la curva de calibración.

V=volumen del filtrado de la muestra en L.

P= peso de la muestra en g.

$$\% \text{Cl}^- = 1,708 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times \frac{1\text{g}}{1000\text{mg}} \times \frac{0,250\text{l}}{2\text{g}} \times 100$$

$$\text{Cl}^- = 0,021 \%$$

En las siguientes tablas se detalla los resultados de los análisis cuantitativos de los iones sulfatos en las probetas sometidas a agua con diferentes valores de pH, obtenidos según la metodología 3.5.2.3.2.

Tabla 17: Resultados del porcentaje de cloruros en las probetas expuestas a agua con pH 9.

Tiempo (Días). Profundidad (mm).	Cantidad de cloruros (%).			
	0	30	60	90
0-3	0,021	0,028	0,043	0,062
3-6	0,021	0,021	0,020	0,022
6-9	0,021	0,021	0,021	0,021

Fuente: (Propia).

Tabla 18: Resultados del porcentaje de cloruros en las probetas expuestas a agua con pH 10.

Tiempo (Días). Profundidad (mm).	Cantidad de cloruros (%).			
	0	30	60	90
0-3	0,0214	0,030	0,042	0,061
3-6	0,0214	0,023	0,024	0,024
6-9	0,0206	0,021	0,021	0,021

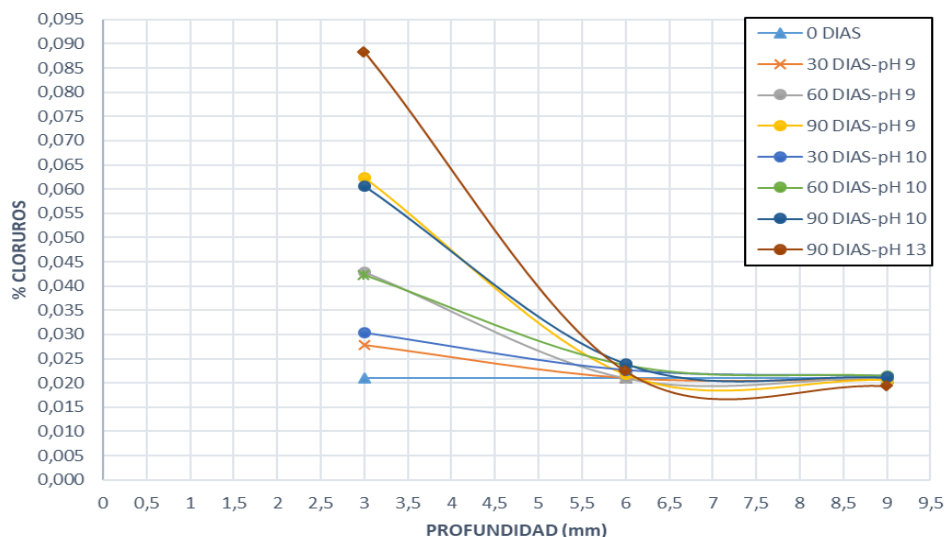
Fuente: (Propia).

Tabla 19: Resultados del porcentaje de cloruros en las probetas expuestas a agua con pH 13.

Tiempo (Días). Profundidad (mm).	Cantidad de cloruros (%).	
	0	90
0-3	0,0214	0,0882
3-6	0,0214	0,0224
6-9	0,0206	0,0194

Fuente: (Propia).

Los resultados obtenidos en los ensayos químicos se muestran en la gráfica 4, en la que se representa la concentración de cloruros totales (expresados en % P de cloruros) en función de la profundidad (mm).



Gráfica 9: Cambios en el contenido de cloruros a diferentes profundidades expuestas a una solución con pH 9, 10 y 13. Fuente: (Propia).

El análisis de penetración de los cloruros se ha realizado mediante la determinación del perfil de penetración según la metodología 2.4.2.2.2, que se ha obtenido analizando químicamente el contenido de cloruros realizadas a diferentes profundidades, este análisis realizado por espectrofotometría UV descrita por Moreno & Esteye.

Como se puede apreciar en la **Gráfica 9**, se ha obtenido un contenido inicial de cloruros en la probeta de referencia que es del 0,02%. Posteriormente se puede apreciar el avance de los cloruros en las probetas expuestas a solución con pH 9 de 0,028% a los 30 días de exposición, finalmente obteniéndose un contenido de 0,062% a los 90 días de exposición. No se obtuvieron cambios mayores en la probeta expuesta a solución con pH de 10, obteniéndose un 0,062% de cloruros a los 90 días.

Por otro lado, las probetas expuestas a un pH 13, se obtuvo un porcentaje del 0,0882% de cloruros, como se puede observar este aumento es mucho mayor en comparación con las probetas sometidas a una solución de pH 9 y pH 10. De esta manera se puede constatar que en esta solución de pH 13 existe un mayor daño y debilitamiento de las probetas, debido a la reacción del aluminato tricalcico (C_3A) con cloruros que se encuentran en los poros de la estructura del hormigón, dando lugar a la formación de monocloroaluminato hidratado o sal de Friedel ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$). Esta sal formada es expansiva, lo cual provocara un debilitamiento en la estructura del hormigón (Fontalvo, Tovar, & Ortiz, 2016).

4.2.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE AVANCE DE LA CARBONATACIÓN.

Se presenta, a continuación, los resultados obtenidos del avance de la carbonatación en el interior de las probetas de hormigón expuestas a diferentes agentes agresivos.



Ilustración 36: Ensayo de carbonatación en muestras de tubos antes de ser expuesta a solución alcalina.

Fuente: (Propia.)

En la **ilustración 36** se puede observar que, al adicionar la solución de fenolftaleína, en la fracción de tubo de hormigón que no estuvo expuesta a ninguna solución, toma un color púrpura desde la superficie, por lo que se aprecia que la tubería no se encuentra carbonatada.

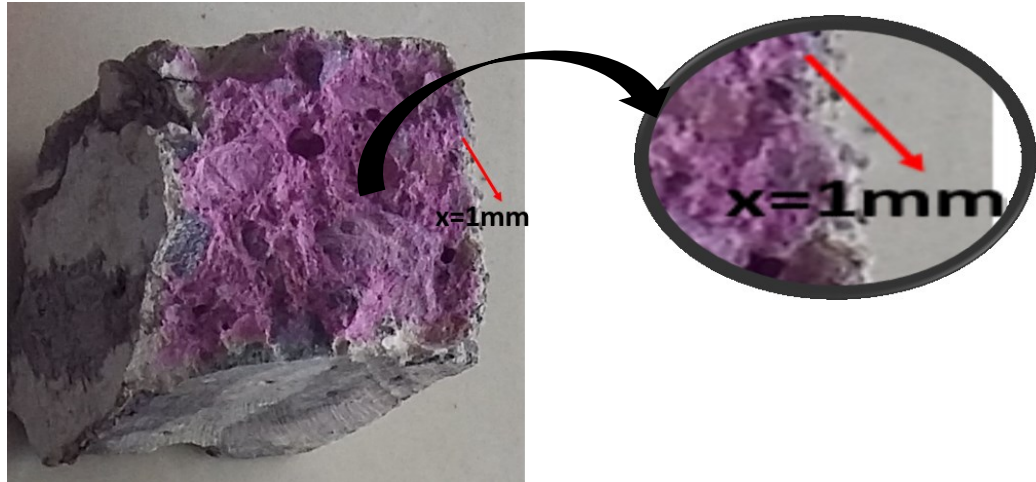


Ilustración 37: Ensayo de carbonatación en probetas expuestas a agua con pH 9.

Fuente: (Propia.)

En la **ilustración 37** se puede observar que, al adicionar la solución de fenolftaleína, en la probeta que ha sido sometida a una solución con pH 9 durante un periodo de 90 días y posteriormente expuesta al ambiente durante un mes, existe una zona que no toma un color púrpura, por lo que se aprecia que la probeta existe una zona carbonatada de 1mm.

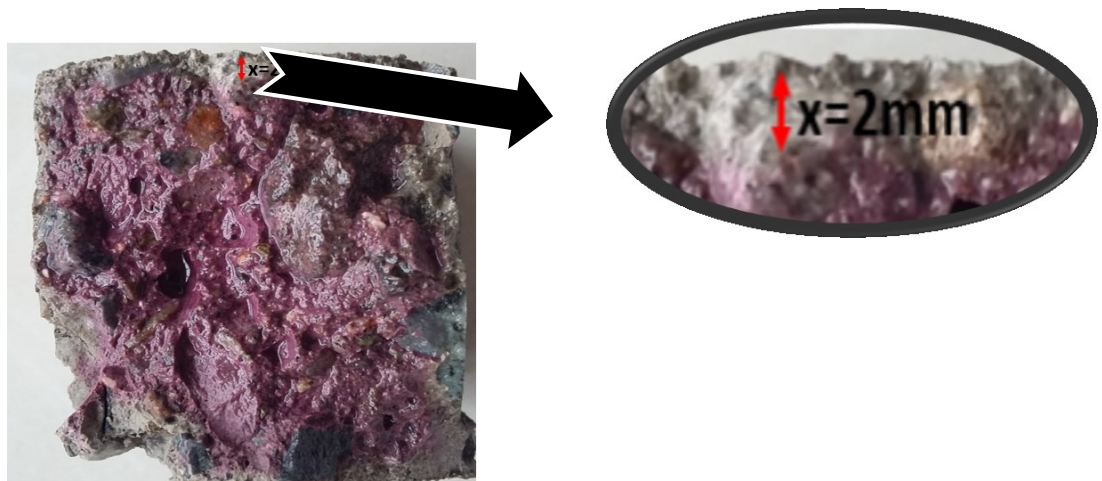


Ilustración 38: Ensayo de carbonatación en probetas expuestas a agua con pH 10.

Fuente: (Propia.)

En la **ilustración 38** se puede observar que, al adicionar la solución de fenolftaleína, en la probeta que ha sido sometida a una solución con pH 10 durante un periodo de 90 días y posteriormente expuesta al ambiente durante un mes, existe una zona que no toma un color púrpura, por lo que se aprecia que la probeta existe una zona carbonatada de 2mm.

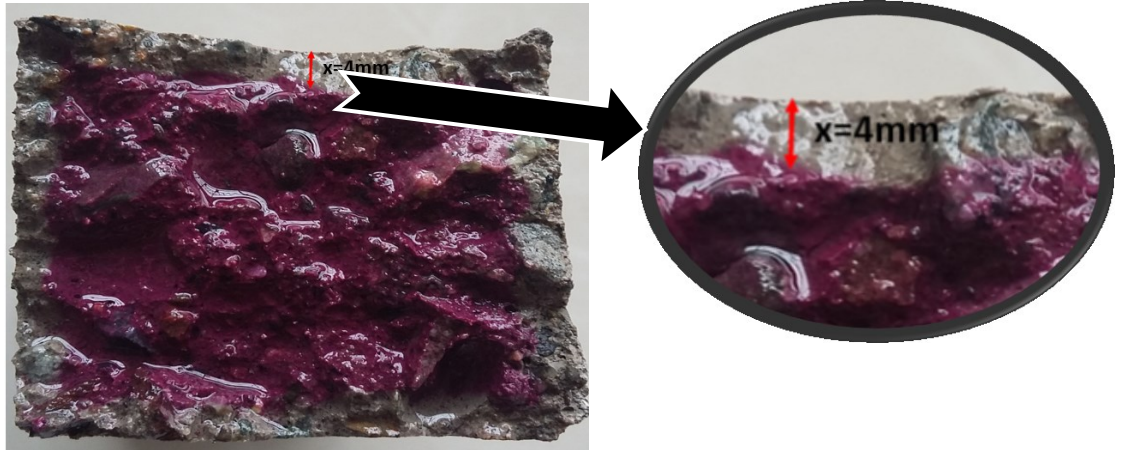


Ilustración 39: Ensayo de carbonatación en probetas expuestas a agua con pH 13.

Fuente: (Propia.)

En la **ilustración 39** se puede observar que, al adicionar la solución de fenolftaleína, en la probeta que ha sido sometida a una solución con pH 13 durante un periodo de 90 días y posteriormente expuesta al ambiente durante un mes, existe una zona que no toma un color púrpura, por lo que se aprecia que la probeta existe una zona carbonatada de 4mm.

En las ilustraciones 37, 38 y 39 se puede constatar que el fenómeno de carbonación aumenta conforme se incrementa el pH en la solución alcalina. Este cambio es debido al aumento de la porosidad en la estructura del espécimen analizado, ya que a mayor pH aumentan las velocidades de reacción provocando fisuras y aumento de la porosidad, de esta manera la difusión del dióxido de carbono será mayor en la probeta expuesta a solución con pH 13, provocado por el fenómeno de carbonatación.

En el caso de este estudio la carbonatación no cumple un papel principal debido a que no se trata de un material con estructuras de refuerzo como el acero, en donde si este proceso avanza lenta y progresivamente hasta el interior y reacciona con el acero de refuerzo causando corrosión, tal como lo explica a Cui, Tang, Liu, Dong, & Xing.

Pero, por otro lado, la difusión de CO_2 en la probeta expuesta a pH 13 será mayor, por lo tanto, habrá una mayor reacción del CO_2 con los

constituyentes del hormigón (Castellote, Andrade, Turrillas, Campo, & Cuello, 2008). El hidróxido de calcio al reaccionar con el CO_2 , forma carbonato de calcio, que se deposita sobre la estructura del hormigón, disminuyendo la porosidad (Cui, Tang, Liu, Dong, & Xing, 2015).

Aunque, por el contrario, a lo que podemos concluir, Castellote et al., 2008, dice expone que aún no se ha demostrado que la carbonatación disminuye la porosidad del hormigón, debido a la formación de carbonato de calcio, por lo que se recomienda la utilizar de técnicas más avanzadas para determinar los efectos de la carbonatación sobre el hormigón.

Como se puede apreciar con los resultados obtenidos anteriormente, la difusión de cloruros, sulfatos, avance del fenómeno de carbonatación dentro de la estructura de la tubería de hormigón, aumenta conforme se incrementa el pH en la solución agresiva, provoca pérdida de su resistencia mecánica, a causa de la reacción entre estas sales los constituyentes del hormigón.

Aunque la mayoría investigación realizadas expresan, que cuanto mayor sea el pH en la estructura del hormigón más estable será. Por otro lado, autores como Gillot y Swenson (1969), y Deng y Tang (1992), afirman que el aumento de la alcalinidad provoca un aumento en la velocidad de la reacción, autores como, Galí et al. (2001) y García et al. (2003) han realizado estudios en los que, a temperatura ambiente, se produce una ligera disminución de la velocidad de la reacción con el aumento de la alcalinidad mientras que a 75°C , la reacción aumenta a medida que lo hace la alcalinidad.

Como se puede observar en las **Gráficas 7 y 9**, las probetas en expuestas en soluciones con pH 13 a los 90 días de exposición, tiene una mayor concentración de sulfatos y cloruros, por ende, existirá una mayor formación de etringita y sal de Friedel provocando un debilitamiento en las probetas, como se puede constatar en la **Gráfica 1**. El debilitamiento es debido a que estas de sales soy expansivas, provocando tensiones mecánicas internas, ocasionando una baja resistencia a la flexión. Tal como lo descrito por Neville, 2004.

5. CONCLUSIONES

Como se ha podido observar las probetas elaboradas según la metodología 3.2.2, y sometidos a soluciones con pH 13 existe una disminución mayor de las propiedades físicas y una mayor concentración de los iones de sulfatos y cloruros en el interior de la probeta, por lo que una tubería de concreto es más susceptible al ataque por sulfatos y cloruros a un pH 13, además existe una disminución de las propiedades mecánicas en las tuberías de hormigón expuestas a soluciones con pH 13, es esto puede asociarse a la formación de etringita (Pedferri et al., 2013). Los diferentes tiempos de inmersión de las probetas (30, 60 y 90 días), demostró que la migración de cloruros y sulfatos tienen una dependencia con la resistencia de la tubería de hormigón. Es importante resaltar que la concentración de cloruros varía con el tiempo y depende de las condiciones ambientales. En cuanto a la porosidad de la muestra, los datos obtenidos en la isoterma de adsorción-desorción presentan un área superficial de 20,89 m²/g. Se descartó la presencia de microporos y mesoporos, en el mismo, por lo que se estima que la muestra analizado está conformado exclusivamente por macroporos, siendo estos los responsables de la migración de los iones sulfatos y cloruros hacia el interior de muestra provocando deterioro en estructura del hormigón.

6. RECOMENDACIONES.

Podríamos indicar que, en este estudio, el tiempo jugó un papel importante, obteniéndose resultados valederos para el lapso de 90 días, pero este estudio podría expandirse a un año o dos, y corroborar el daño de largo plazo de las tuberías expuestas a un pH alcalino elevado y controlar el sistema de alcantarillado en la una ciudad.

Si bien no se pudo realizar un análisis hidrostático en las tuberías otorgadas por la empresa “**PRE FABRICADOS DEL AUSTRO**”, debido a que no se posee los equipos necesarios para este análisis, ya que sería de gran importancia realizar este análisis para poder determinar por fugas internas del líquido circundante y ser un complemento con el área BET.

Podríamos recomendar realizar un análisis de la forma de los poros por microscopia confocal, para determinar la forma de los poros resultantes por la expansión de la etringita.

Como se pudo constatar en el desarrollo de este trabajo, el agua un factor fundamental ya que con ello se transporta la mayoría de compuestos químicos agresivos, por ello se recomienda realizar un análisis de la calidad de agua, así como también colocar en el área de captación desarenadoras o trampas, de esta manera asegurar la calidad del agua.

7. BIBLIOGRAFÍA.

- Aguirre-Guerrero, A. M., Mejía-De-Gutiérrez, R., & Montês-Correia, M. J. R. (2016). *Corrosion performance of blended concretes exposed to different aggressive environments*, 121, 704–716.
- Aguirre, A. M., & Mejia de Gutierrez, R. (2013). Durabilidad del hormigon armado expuesto a condiciones agresivas, 63(309), 7–38.
- Amancha, H. (2012). Estudio de fabricación de tubos de hormigón mediante vibro-compactación en la fábrica “San Jacinto” en la parroquia Izamba para mejorar los niveles de producción. Tesis Universidad de Universidad Técnica de Ambato, 6-34.
- Anonimo. (n.d). Sustancias quimicas que ejercen una accion sobre el hormigon. Instituto de cemento porlant argentino, 3-11.
- Anonimo. (n.d). Procesos químicos de deterioro en el hormigón. (17 octubre 2016). Recuperado de <http://www.arquitectogustavo.com.ar/Archs/UNC-DeterioroHormigon.pdf>), 1-4.
- Anonimo. (n.d.). Condiciones de Aceptabilidad de los Tubos de Hormigón Armado | Construpedia, enciclopedia construcción. (27 marzo 2017 Recuperado de http://www.construmatica.com/construpedia/Condiciones_de_Aceptabilidad_de_los_Tubos_de_Hormig%C3%B3n_Armado), 1.
- Arenzana Castillo, J., et al. (2006). Manual de calculo, diseño e instalacion de tubos de hormigon armado, 9-42.
- Atiş, C. D. (2003). *Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash*. Construction and Building Materials, 17(3), 147–152.
- Beddoe, R. E. (2010). *Determination of chlorides in concrete structures*. Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures, 198–216.
- Bellmann, F., Erfurt, W., & Ludwig, H. M. (2012). *Field performance of concrete exposed to sulphate and low pH conditions from natural and industrial sources*. Cement and Concrete Composites, 34(1), 86–93.
- Bermúdez Odriozola, M. Á. (2007). Corrosión de las armaduras del hormigón armado en ambiente marino: zona de carrera de mareas y zona sumergida, 544.
- Blanco, T. (n.d.). Ataque por sulfatos con formación de taumasita en sistemas cementantes : efecto del catión, 4–6.

- Bnci, H., Durgun, M. Y., Rzaolu, T., & Koluçolak, M. (2012). *Investigation of durability properties of concrete pipes incorporating blast furnace slag and ground basaltic pumice as fine aggregates*. Scientia Iranica, 19(3), 366–372.
- Brunauer, S., P. H. Emmett & Tell, E. (1936). Gases in Multimolecular Layers, 407(1).
- Castellote, M., Andrade, C., Turrillas, X., Campo, J., & Cuello, G. J. (2008). *Accelerated carbonation of cement pastes in situ monitored by neutron diffraction*. Cement and Concrete Research, 38(12), 1365–1373.
- Neill, R., et al. (2001). Guía para la Durabilidad del Hormigón. American Concrete Institute, 1–59.
- Cui, H., Tang, W., Liu, W., Dong, Z., & Xing, F. (2015). Experimental study on effects of CO₂ concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms. Construction and Building Materials, 93, 522–527.
- D'Andrea, R. (2010). Predicción de la durabilidad del hormigón armado a partir de indicadores de corrosión: aplicación de la resistividad eléctrica, 330.
- González, E., & Alloza, A.M. (n.d.). Corrosión en armaduras . Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio. Materiales de construccion, 89–94.
- Fernandes, I., Pericão, M., Hagelia, P., Noronha, F., Ribeiro, M. a., & Maia, J. (2012). Identification of acid attack on concrete of a sewage system. Materials and Structures, 45(3), 337–350.
- Fontalvo, M. B., Tovar, C. T., & Ortiz, Á. V. (2016). Método de perfiles de difusión de cloruros para la estimación de la corrosión en ambientes marinos Method of chloride dissemination profiles for corrosion estimate in marine environments, 14(1), 23–27.
- Galán García, I. (2011). Carbonatación del hormigón: Combinación de CO₂ con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de PH, 3-30.
- González, E. & Alloza, A. (n.d). Corrosión en armaduras. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio. Materiales de Construcción, 89-94.
- Hill, J., Byars, E. A., Sharp, J. H., Lynsdale, C. J., Cripps, J. C., & Zhou, Q. (2003). An experimental study of combined acid and sulfate attack of concrete. Cement and Concrete Composites, 25(8), 997–1003.
- Hobbs, D. W., & Taylor, M. G. (2000). Nature of the thaumasite sulfate attack mechanism in field concrete. Cement and Concrete Research, 30(4), 529–



533.

Hossain, K. M. A., & Lachemi, M. (2006). Performance of volcanic ash and pumice based blended cement concrete in mixed sulfate environment. *Cement and Concrete Research*, 36(6), 1123–1133.

Institut de promocio cerámica. (2004). Resistencia a la flexion, 1-5.

Matti, M.A. & Al-Adeeb, A. (1985). Sulphate attack on asbestos cement pipes, 7, 169–176.

Mori, T., et al. (1991). *Interactions of nutrients, moisture and ph on microbial corrosion of concrete sewer pipes*, 26(1), 29--37.

Moreno, F., Esteve Sala, J. (n.d). Determinación de cloruro en materias primas y productos terminados de la industria del cemento. *Materiales de construccion, Consejo Superior de Investigaciones Científicas España*, 13-27.

NORMA ASTM C 1580-05. Standard Test Method for Water Soluble Sulfate in Soil.

NORMA ASTM C 114 – 07. Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement.

NORMA ASTM 1218/C 1218M – 99. Standard Test Method for Water Soluble Chloride in Mortar and Concrete.

Norma INEN 1587 (1987). Tubos de hormigon y de gres. Determinación de la resistencia a la flexión. Metodo de los tres apoyos.

NORMA NTE INEN 1590 (1987). Tubos y accesorios de hormigón simple.

NORMA NTE INEN 1588 (1987). Tubería de hormigón y gres. Ensayo de absorción.

Pedeferri, P., et al. (2013). Corrosion of Steel in Concrete - Prevention, Diagnosis, Repair, 49-67.

Puma, G. (2011). Propuesta de redistribucion de planta y mejoramiento de la produccion para la empresa “Prefabricados del Austro”. Tesis, Universidad Politecnica Salesiana SEDE Cuenca, 9-25.

Performance, M., & Spectrophotometers, V. (2010). Standard Test Method for Water-Soluble Sulfate in Soil 1, (c), 1–3.



- Rahman, K. Z., et al. (2014). Removal and fate of arsenic in the rhizosphere of *Juncus effusus* treating artificial wastewater in laboratory-scale constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 69, 93–105.
- Segarra Foradada, J. (2005). Envejecimiento de presas por reacciones expansivas en hormigón. *Universitat Politècnica Catalunya Barcelona Tech*, 11-36.
- Sika. (17 octubre 2016). Manual del hormigón. Recuperado de <http://www.sika.com.ec>, 1-43.
- Sulikowski, J., & Kozubal, J. (2016). The Durability of a Concrete Sewer Pipeline under Deterioration by Sulphate and Chloride Corrosion. *Procedia Engineering*, 153, 698–705.
- Thiery, M., Villain, G., Dangla, P., & Platret, G. (2007). Investigation of the carbonation front shape on cementitious materials: Effects of the chemical kinetics. *Cement and Concrete Research*, 37(7), 1047–1058.
- Torres Dávila, V. (2012). Estado e industrialización en Ecuador. *Secretaría Técnica de Investigación, Universidad Politécnica Salesiana*, 7-11.
- Tovar, C. T., Ortiz, A. V., Paola, Y., & Durán, V. (2013). Modelo de difusión de cloruros en probetas cilíndricas de hormigón armado sumergidas en agua sintética *Resumen Introducción*, 26.
- Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete*. Lund University, 17-72.

ANEXOS.

ANEXO 1

RESISTENCIA A LA FLEXIÓN.

Tabla 20: Valores de resistencia a flexión obtenidos a los 0 de días exposición.

	Probeta 1.	Probeta 2.	Promedio.
F=(N)	236,159	234,417	235,288
L=(m)	0,4	0,4	0,4
b=(m)	0,04	0,04	0,04
h=(m)	0,04	0,04	0,04

Fuente: (Propia).

$$R = \frac{3FL}{2bh^2} = \frac{3S}{2h^2}$$

$$R = \frac{3(235,288)(0.4m)}{2(0.04m)(0.04m)^2} = 2205825 \frac{N}{m^2}$$

Tabla 21: Valores de resistencia a flexión obtenidos a los 30 de días exposición en agua con pH 9.

	Probeta 1.	Probeta 2.	Promedio.
F=(N)	235,359	232,417	233,888
L=(m)	0,4	0,4	0,4
b=(m)	0,04	0,04	0,04
h=(m)	0,04	0,04	0,04

Fuente: (Propia).

$$R = \frac{3FL}{2bh^2} = \frac{3S}{2h^2} \quad (1)$$

$$R = \frac{3(233,888)(0.4m)}{2(0.04m)(0.04m)^2} = 2192700$$

Tabla 22: Valores de resistencia a flexión obtenidos a los 60 de días exposición en agua con pH 9.

	Probeta 1.	Probeta 2.	Promedio.
F=(N)	229,349	230,764	230,0565
L=(m)	0,4	0,4	0,4
b=(m)	0,04	0,04	0,04
h=(m)	0,04	0,04	0,04

Fuente: (Propia).

$$R = \frac{3FL}{2bh^2} = \frac{3S}{2h^2} \quad (1)$$

$$R = \frac{3(230,0565)(0,4m)}{2(0,04m)(0,04m)^2} = 2156779,688 \frac{N}{m^2}$$

Tabla 23: Valores de resistencia a flexión obtenidos a los 90 de días exposición en agua con pH 9.

	Probeta 1.	Probeta 2.	Promedio.
F=(N)	226,482	225,992	226,237
L=(m)	0,4	0,4	0,4
b=(m)	0,04	0,04	0,04
h=(m)	0,04	0,04	0,04

Fuente: (Propia).

$$R = \frac{3FL}{2bh^2} = \frac{3S}{2h^2} \quad (1)$$

$$R = \frac{3(226,237)(0,4m)}{2(0,04m)(0,04m)^2} = 2120971,875 \frac{N}{m^2}$$

Tabla 24: Valores de resistencia a flexión obtenidos a los 30 de días exposición en agua con pH 10.

	Probeta 1.	Probeta 2.	Promedio.
F=(N)	218,037	218,928	218,482
L=(m)	0,4	0,4	0,4
b=(m)	0,04	0,04	0,04
h=(m)	0,04	0,04	0,04

Fuente: (Propia).

$$R = \frac{3FL}{2bh^2} = \frac{3S}{2h^2} \quad (1)$$

$$R = \frac{3(218,482)(0.4m)}{2(0.04m)(0.04m)^2} = 2100046,875$$

Tabla 25: Valores de resistencia a flexión obtenidos a los 60 de días exposición en agua con pH 10.

	Probeta 1.	Probeta 2.	Promedio.
F=(N)	222,098	225,912	224,005
L=(m)	0,4	0,4	0,4
b=(m)	0,04	0,04	0,04
h=(m)	0,04	0,04	0,04

Fuente: (Propia).

$$R = \frac{3FL}{2bh^2} = \frac{3S}{2h^2} \quad (1)$$

$$R = \frac{3(224,005)(0.4m)}{2(0.04m)(0.04m)^2} = 2048273,438 \frac{N}{m^2}$$

Tabla 26: Valores de resistencia a flexión obtenidos a los 90 de días exposición en agua con pH 10.

	Probeta 1.	Probeta 2.	Promedio.
F=(N)	218,037	218,928	218,4825
L=(m)	0,4	0,4	0,4
b=(m)	0,04	0,04	0,04
h=(m)	0,04	0,04	0,04

Fuente: (Propia).

$$R = \frac{3FL}{2bh^2} = \frac{3S}{2h^2} \quad (1)$$

$$R = \frac{3(218,4825)(0.4m)}{2(0.04m)(0.04m)^2} = 1969307,813 \frac{N}{m^2}$$

Tabla 27: Valores de resistencia a flexión obtenidos a los 90 de días exposición en agua con pH 13.

	Probeta 1.	Probeta 2.	Promedio.
F=(N)	210,127	209,992	210,0595
L=(m)	0,4	0,4	0,4
b=(m)	0,04	0,04	0,04
h=(m)	0,04	0,04	0,04

Fuente: (Propia).

$$R = \frac{3FL}{2bh^2} = \frac{3S}{2h^2} \quad (1)$$

$$R = \frac{3(210,0595)(0.4m)}{2(0.04m)(0.04m)^2} = 1615500 \frac{N}{m^2}$$

ANEXO 2

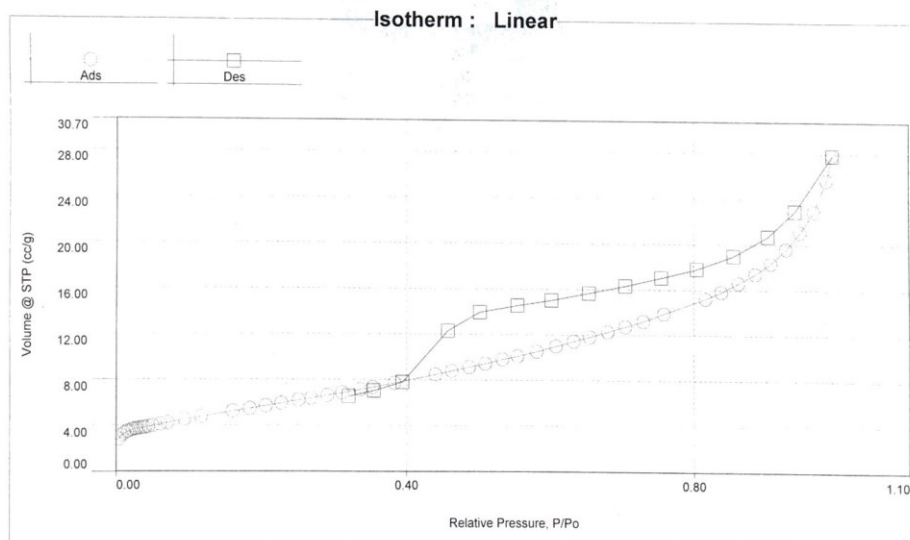
POROSIDAD.

UNIVERSIDAD DE CUENCA
LABORATORIO DE INGENIERIA DE REACTORES Y CATALISIS
Quantachrome NovaWin ©1994-2013, Quantachrome Instruments v11.03

Quantachrome
INSTRUMENTS

Analysis		Report	
Operator:	U de Cuenca	Operator:	U de Cuenca
Sample ID:	PRCR	Filename:	sttn_A_2017_06_15_001.qps
Sample Desc:	CEMENTA	Comment:	Celda 1
Sample weight:	0.1112 g	Sample Volume:	1 cc
Outgas Time:	3.0 hrs	Outgas Temp:	300.0 C
Analysis gas:	Nitrogen	Bath Temp:	273.0 K
Press. Tolerance:	0.100/0.100 (ads/des)	Equil time:	90/90 sec (ads/des)
Analysis Time:	452.9 min	End of run:	2017/06/16 23:22:37
Cell ID:	0	Equil timeout:	240/240 sec (ads/des)
		Instrument:	Nova Station A

Analysis Data	
Administrative information	
Analysis performed on:	2017/06/16
Analysis performed by:	U de Cuenca
Comments:	Celda 1
Instrument:	NOVA Station: A
Instrument version:	0.00
Software version:	11.0
Sample information	
Id:	PRCR
Description:	CEMENTA
Weight:	0.1112 g
Volume:	1 cc
Sample preparation information	
Outgas time:	3.0 hrs
Outgas temperature:	300.0 C
Analysis information	
Ambient temperature:	295.5 K
Thermal delay:	300 sec
Pressure tolerance:	0.100/0.100 (ads/des)
Equilibration time:	90/90 sec (ads/des)
Equilibration timeout:	240/240 sec (ads/des)



Analysis

Operator: U de Cuenca
Sample ID: PRCR

Date:2017/06/16
Filename:

Report

Operator: U de Cuenca
sttn_A_2017_06_15_001.qps

Date:2017/07/20

Isotherm

Relative Pressure	Volume @ STP [cc/g]	Relative Pressure	Volume @ STP [cc/g]	Relative Pressure	Volume @ STP [cc/g]
4.47500e-03	2.8073	2.50829e-01	6.1843	8.63079e-01	16.5917
7.90400e-03	3.1195	2.68324e-01	6.3421	8.86735e-01	17.4174
1.14270e-02	3.3057	2.90632e-01	6.6139	9.08751e-01	18.3522
1.49230e-02	3.4434	3.10680e-01	6.8223	9.29835e-01	19.6237
1.72870e-02	3.4973	3.36088e-01	7.1063	9.49798e-01	21.0854
2.08390e-02	3.5827	3.53648e-01	7.3112	9.68752e-01	22.9204
2.33640e-02	3.6285	3.83832e-01	7.6895	9.86784e-01	25.6435
2.65570e-02	3.6833	4.41064e-01	8.4431	9.95121e-01	27.8290
2.87710e-02	3.7032	4.63966e-01	8.7710	9.42553e-01	22.9244
3.17580e-02	3.7383	4.88385e-01	9.1152	9.04549e-01	20.6962
3.46220e-02	3.7724	5.10929e-01	9.4228	8.56239e-01	18.9924
3.79750e-02	3.8083	5.35018e-01	9.8026	8.04689e-01	17.8242
4.06510e-02	3.8214	5.56215e-01	10.1023	7.55503e-01	17.0381
4.47020e-02	3.8792	5.82659e-01	10.5084	7.05817e-01	16.3178
5.06750e-02	3.9529	6.09631e-01	10.9832	6.55265e-01	15.6543
6.15370e-02	4.0926	6.34021e-01	11.4048	6.03554e-01	15.0203
7.09860e-02	4.2032	6.56584e-01	11.7839	5.55725e-01	14.5429
9.41890e-02	4.4901	6.81436e-01	12.2450	5.03373e-01	13.9371
1.17440e-01	4.7504	7.05601e-01	12.7049	4.58624e-01	12.2977
1.60653e-01	5.2310	7.30509e-01	13.1976	3.94987e-01	7.7715
1.83970e-01	5.4665	7.59101e-01	13.8611	3.55137e-01	7.0125
2.05996e-01	5.6888	8.17397e-01	15.2114	3.19950e-01	6.5093
2.27004e-01	5.8943	8.38877e-01	15.8032		

MBET summary

Slope = 166.197
Intercept = 1.758e+00
Correlation coefficient, r = 0.999391
C constant = 95.514
Surface Area = 20.735 m²/g

Multi-Point BET

Relative Pressure [P/Po]	Volume @ STP [cc/g]	1 / [W((Po/P) - 1)]	Relative Pressure [P/Po]	Volume @ STP [cc/g]	1 / [W((Po/P) - 1)]
4.47500e-03	2.8073	1.2811e+00	6.15370e-02	4.0926	1.2819e+01
7.90400e-03	3.1195	2.0434e+00	7.09860e-02	4.2032	1.4545e+01
1.14270e-02	3.3057	2.7978e+00	9.41890e-02	4.4901	1.8529e+01
1.49230e-02	3.4434	3.5200e+00	1.17440e-01	4.7504	2.2413e+01
1.72870e-02	3.4973	4.0244e+00	1.60653e-01	5.2310	2.9276e+01
2.08390e-02	3.5827	4.7530e+00	1.83970e-01	5.4665	3.2997e+01
2.33640e-02	3.6285	5.2751e+00	2.05996e-01	5.6888	3.6489e+01
2.65570e-02	3.6833	5.9263e+00	2.27004e-01	5.8943	3.9863e+01
2.87710e-02	3.7032	6.4003e+00	2.50829e-01	6.1843	4.3316e+01
3.17580e-02	3.7383	7.0202e+00	2.68324e-01	6.3421	4.6265e+01
3.46220e-02	3.7724	7.6066e+00	2.90632e-01	6.6139	4.9564e+01
3.79750e-02	3.8083	8.2934e+00	3.10680e-01	6.8223	5.2858e+01
4.06510e-02	3.8214	8.8720e+00	3.36088e-01	7.1063	5.6997e+01
4.47020e-02	3.8792	9.6515e+00	3.53648e-01	7.3112	5.9877e+01
5.06750e-02	3.9529	1.0805e+01			

UNIVERSIDAD DE CUENCA
LABORATORIO DE INGENIERIA DE REACTORES Y CATALISIS
Quantachrome NovaWin ©1994-2013, Quantachrome Instruments v11.03

**Analysis**

Operator: U de Cuenca
Sample ID: PRCR

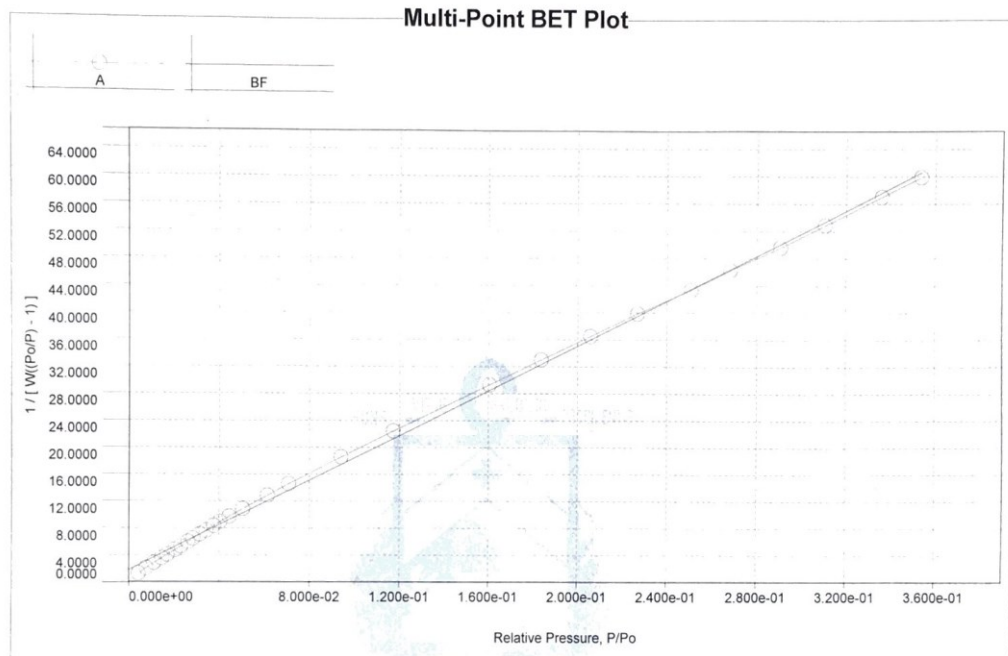
Date: 2017/06/16

Filename:

Report

Operator: U de Cuenca
sttn_A_2017_06_15_001.qps

Date: 2017/07/20



ANEXO 3.

SULFATOS.

RESULTADOS DE LAS EVALUACIONES DE LA CONCENTRACIÓN DE SULFATOS EN LA PROBETA DE REFERENCIA.

Tabla 28: Valores de las absorbancias de la muestra a una profundidad de 3mm.

	ABSORBANCIA		
	LECTURA 1	LECTURA 2	PROMEDIO
MUESTRA.	0,333	0,330	0,332

Fuente: (Propia).

$$x = \frac{y + 0,0081}{0,0079}$$

$$x = \frac{0,332 + 0,0081}{0,0079}$$

$$x = 43,210 \text{ mg/l}$$

Para determinar el porcentaje en peso de sulfatos ($\% SO_4^{=}$), se hace el uso de la siguiente formula.

$$P = \frac{2.5 * M}{A * W}$$

Donde:

P= $\% SO_4^{=}$ en la muestra.

M= mg/l de $SO_4^{=}$ determinado en la curva de calibración.

A= masa de la muestra en g.

W= volumen de la alícuota en ml.

$$P = \frac{2.5 * 43,210 \text{ mg/l}}{10\text{ml} * 30\text{g}}$$

$$P = 0,360 \%$$

Tabla 29: Valores de las absorbancias de la muestra a una profundidad de 6mm.

	ABSORBANCIA		
	LECTURA 1	LECTURA 2	PROMEDIO
MUESTRA.	0,300	0,308	0,304

Fuente: (Propia).

Determinación de la concentración de sulfatos en mg/l.

$$x = \frac{y + 0,0081}{0,0079}$$

$$x = \frac{0,304 + 0,0081}{0,0079}$$

$$x = 39,712 \text{ mg/l}$$

Determinación del porcentaje en peso de sulfatos (% $SO_4^{=}$).

$$P = \frac{2.5 * M}{A * W}$$

$$P = \frac{2.5 * 39,712 \text{ mg/l}}{10\text{ml} * 30\text{g}}$$

$$P = 0,331\%$$

Tabla 30: Valores de las absorbancias de la muestra a una profundidad de 6mm.

	ABSORBANCIA		
	LECTURA 1	LECTURA 2	PROMEDIO
MUESTRA.	0,302	0,298	0,300

Fuente: (Propia).

Determinación de la concentración de sulfatos en mg/l.

$$x = \frac{y + 0,0081}{0,0079}$$

$$x = \frac{0,300 + 0,0081}{0,0079}$$

$$x = 39,203 \text{ mg/l}$$

Determinación del porcentaje en peso de sulfatos ($\% \text{SO}_4^{=}$).

$$P = \frac{2.5 * M}{A * W}$$

$$P = \frac{2.5 * 39,203 \text{ mg/l}}{10 \text{ ml} * 30 \text{ g}}$$

$$P = 0,327\%$$

RESULTADOS DEL CONTENIDO DE IONES SULFATOS EN LAS PROBETAS EXPUESTAS A 30 DÍAS EN LA SOLUCIÓN CON pH 9.

Tabla 31: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 3mm.

	ABSORBANCIA	CONCENTRACIÓN (mg/l)	$\% \text{SO}_4^{=}$
MUESTRA	0,435	56,060	0,467
DUPLICADO	0,430		
PROMEDIO	0,433		

Fuente: (Propia).

Tabla 32: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 6mm.

	ABSORBANCIA	CONCENTRACIÓN (mg/l)	$\% \text{SO}_4^{=}$
MUESTRA	0,295	38,885	0,324
DUPLICADO	0,300		
PROMEDIO	0,298		

Fuente: (Propia).

Tabla 33: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 9mm.

	ABSORBANCIA	CONCENTRACIÓN (mg/l)	% $SO_4^{=}$
MUESTRA	0,294	38,948	0,325
DUPLICADO	0,302		
PROMEDIO	0,298		

Fuente: (Propia).

RESULTADOS DEL CONTENIDO DE IONES SULFATOS EN LAS PROBETAS EXPUESTAS A 60 DÍAS EN LA SOLUCIÓN CON pH 9

Tabla 34: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 3mm.

	ABSORBANCIA	CONCENTRACIÓN (mg/l)	% $SO_4^{=}$
MUESTRA	0,520	67,574	0,563
DUPLICADO	0,526		
PROMEDIO	0,523		

Fuente: (Propia).

Tabla 35: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 6mm.

	ABSORBANCIA	CONCENTRACIÓN (mg/l)	% $SO_4^{=}$
MUESTRA	0,308	39,712	0,331
DUPLICADO	0,300		
PROMEDIO	0,304		

Fuente: (Propia).

Tabla 36: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 9mm.

	ABSORBANCIA	CONCENTRACIÓN (mg/l)	% $SO_4^{=}$
MUESTRA	0,302	39,966	0,333
DUPLICADO	0,310		
PROMEDIO	0,306		

Fuente: (Propia).

RESULTADOS DEL CONTENIDO DE IONES SULFATOS EN LAS PROBETAS EXPUESTAS A 90 DÍAS EN LA SOLUCIÓN CON pH 9.

Tabla 37: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 3mm.

	ABSORBANCIA	CONCENTRACIÓN (mg/l)	% $SO_4^{=}$
MUESTRA	0,630	80,997	0,675
DUPLICADO	0,627		
PROMEDIO	0,629		

Fuente: (Propia).

Tabla 38: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 6mm.

	ABSORBANCIA	CONCENTRACIÓN (mg/l)	% $SO_4^{=}$
MUESTRA	0,326	42,256	0,352
DUPLICADO	0,322		
PROMEDIO	0,324		

Fuente: (Propia).

Tabla 39: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 9mm.

	ABSORBANCIA	CONCENTRACIÓN (mg/l)	% $SO_4^{=}$
MUESTRA	0,306	39,584	0,330
DUPLICADO	0,300		
PROMEDIO	0,303		

Fuente: (Propia).

RESULTADOS DEL CONTENIDO DE IONES SULFATOS EN LAS PROBETAS EXPUESTAS A 30 DÍAS EN LA SOLUCIÓN CON pH 10.

Tabla 40: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 3mm.

	ABSORBANCIA	CONCENTRACIÓN (mg/l)	% $SO_4^{=}$
MUESTRA	0,480	62,485	0,521
DUPLICADO	0,486		
PROMEDIO	0,483		

Fuente: (Propia).

Tabla 41: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 6mm.

	ABSORBANCIA	CONCENTRACIÓN (mg/l)	% $SO_4^{=}$
MUESTRA	0,304	39,330	0,328
DUPLICADO	0,298		
PROMEDIO	0,301		

Fuente: (Propia).

Tabla 42: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 9mm.

	ABSORBANCIA	CONCENTRACIÓN (mg/l)	% $SO_4^{=}$
MUESTRA	0,302	39,330	0,328
DUPLICADO	0,300		
PROMEDIO	0,301		

Fuente: (Propia).

RESULTADOS DEL CONTENIDO DE IONES SULFATOS EN LAS PROBETAS EXPUESTAS A 60 DÍAS EN LA SOLUCIÓN CON pH 10.

Tabla 43: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 3mm.

	ABSORBANCIA	CONCENTRACIÓN (mg/l)	% $SO_4^{=}$
MUESTRA	0,550	71,009	0,592
DUPLICADO	0,550		
PROMEDIO	0,550		

Fuente: (Propia).

Tabla 44: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 6mm.

	ABSORBANCIA	CONCENTRACIÓN (mg/l)	% $SO_4^{=}$
MUESTRA	0,310	40,793	0,340
DUPLICADO	0,315		
PROMEDIO	0,313		

Fuente: (Propia).

Tabla 45: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 9mm.

	ABSORBANCIA	CONCENTRACIÓN (mg/l)	% $SO_4^{=}$
MUESTRA	0,300	39,584	0,330
DUPLICADO	0,306		
PROMEDIO	0,303		

Fuente: (Propia).

RESULTADOS DEL CONTENIDO DE IONES SULFATOS EN LAS PROBETAS EXPUESTAS A 90 DÍAS EN LA SOLUCIÓN CON pH 10.

Tabla 46: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 3mm.

	ABSORBANCIA	CONCENTRACIÓN (mg/l)	% $SO_4^{=}$
MUESTRA	0,655	84,368	0,703
DUPLICADO	0,655		
PROMEDIO	0,655		

Fuente: (Propia).

Tabla 47: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 6mm.

	ABSORBANCIA	CONCENTRACIÓN (mg/l)	% $SO_4^{=}$
MUESTRA	0,328	43,020	0,358
DUPLICADO	0,332		
PROMEDIO	0,330		

Fuente: (Propia).

Tabla 48: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 9mm.

	ABSORBANCIA	CONCENTRACIÓN (mg/l)	% $SO_4^{=}$
MUESTRA	0,304	39,966	0,333
DUPLICADO	0,308		
PROMEDIO	0,306		

Fuente: (Propia).

RESULTADOS DEL CONTENIDO DE IONES SULFATOS EN LAS PROBETAS EXPUESTAS A 90 DÍAS EN LA SOLUCIÓN CON pH 13.

Tabla 49: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 3mm.

	ABSORBANCIA	CONCENTRACIÓN (mg/l)	% $SO_4^{=}$
MUESTRA	0,980	122,536	1,021
DUPLICADO	0,930		
PROMEDIO	0,955		

Fuente: (Propia).

Tabla 50: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 6mm.

	ABSORBANCIA	CONCENTRACIÓN (mg/l)	% $SO_4^{=}$
MUESTRA	0,500	63,376	0,528
DUPLICADO	0,480		
PROMEDIO	0,490		

Fuente: (Propia).

Tabla 51: Valores de las absorbancias y la concentración de sulfatos a una profundidad de 9mm.

	ABSORBANCIA	CONCENTRACIÓN (mg/l)	% $SO_4^{=}$
MUESTRA	0,302	39,648	0,330
DUPLICADO	0,305		
PROMEDIO	0,304		

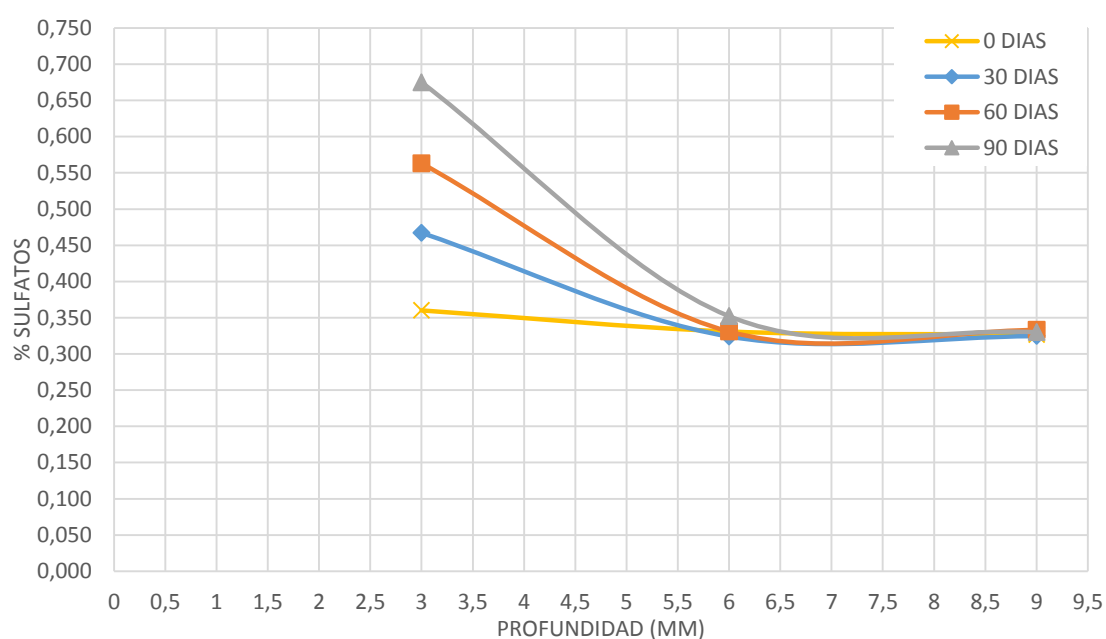
Fuente: (Propia).

RESULTADOS DEL CONTENIDO DE IONES SULFATOS EN LAS PROBETAS EXPUESTAS EN LA SOLUCIÓN CON pH 9.

Tabla 52: Resultados del porcentaje de sulfatos en las probetas expuestas a agua con pH 9.

	% SULFATOS			
PROFUNDIDAD (mm)	0 DIAS	30 DIAS	60 DIAS	90 DIAS
3	0,360	0,467	0,563	0,675
6	0,330	0,324	0,331	0,352
9	0,326	0,325	0,333	0,330

Fuente: (Propia).



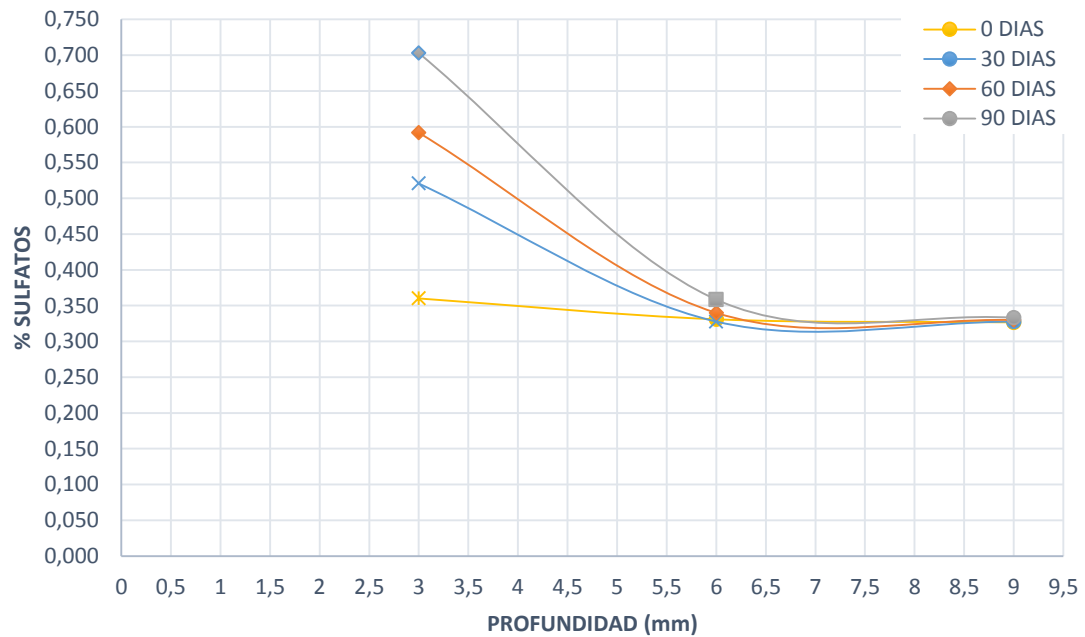
Grafica 10: Cambios en el contenido de sulfatos a diferentes profundidades expuestas a una solución con pH 9. **Fuente:** (Propia).

RESULTADOS DEL CONTENIDO DE IONES SULFATOS EN LAS PROBETAS EXPUESTAS EN LA SOLUCIÓN CON pH 10.

Tabla 53: Valores del porcentaje de sulfatos en las probetas expuestas a agua con pH 10.

	% SULFATOS			
	TIEMPO DE EXPOSICIÓN			
PROFUNDIDAD (mm)	0	30	60	90
3	0,360	0,521	0,592	0,703
6	0,330	0,328	0,340	0,358
9	0,326	0,328	0,330	0,333

Fuente: (Propia).



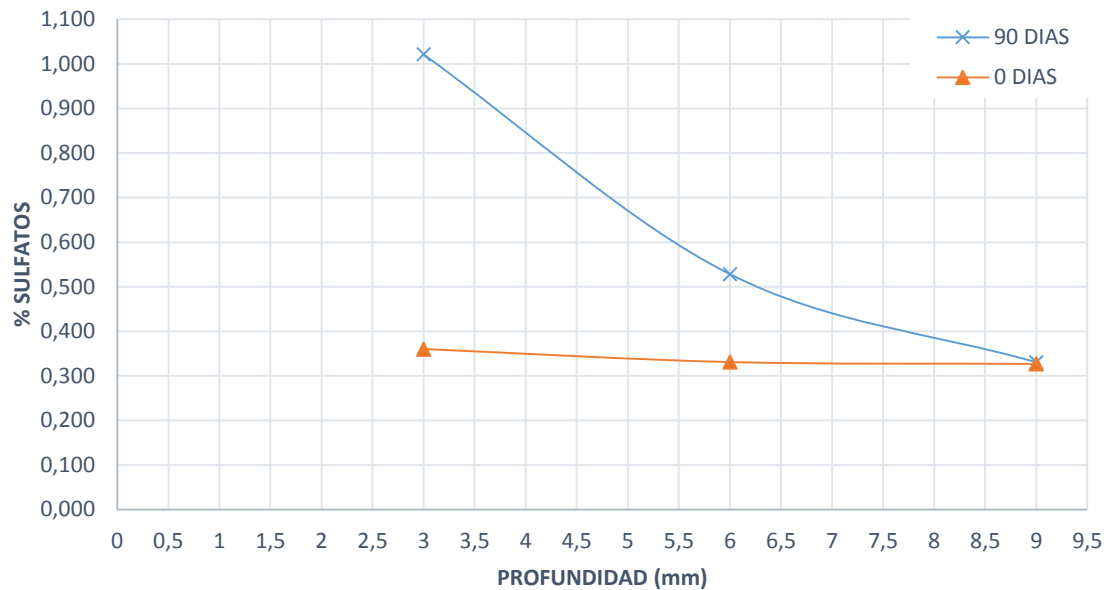
Grafica 11: Cambios en el contenido de sulfatos a diferentes profundidades expuestas a una solución con pH 10. **Fuente:** (Propia).

RESULTADOS DEL CONTENIDO DE IONES SULFATOS EN LAS PROBETAS EXPUESTAS EN LA SOLUCIÓN CON PH 13.

Tabla 54: Valores del porcentaje de sulfatos en las probetas expuestas a agua con pH 13.

PROFUNDIDAD (mm)	% SULFATOS	
	0 DIAS	90 DIAS
3	0,360	1,021
6	0,330	0,528
9	0,326	0,330

Fuente: (Propia).



Grafica 12: Cambios en el contenido de sulfatos a diferentes profundidades expuestas a una solución con pH 13. **Fuente:** (Propia).

ANEXO 4.

RESULTADOS DEL CONTENIDO DE IONES CLORUROS EN LA PROBETA DE REFERENCIA.

Tabla 55: Valores de las absorbancias de la muestra a una profundidad de 3mm.

	ABSORBANCIA		
	LECTURA 1	LECTURA 2	PROMEDIO
MUESTRA.	0,060	0,068	0,064

Fuente: (Propia).

Determinación de la concentración de cloruros en mg/l.

$$x = \frac{y - 0,0037}{0,0353}$$

$$x = \frac{0,064 - 0,0037}{0,0353}$$

$$x = 1,708 \text{ mg/l}$$

Para determinar en porcentaje en peso cloruros en la muestra ($\% Cl^-$), se hace el uso de la siguiente formula.

$$\%Cl^- = C \times \frac{V}{P} \times 100$$

Donde:

C= concentración de cloruros en g/l, determinado en la curva de calibración.

V=volumen del filtrado de la muestra en l.

P= peso de la muestra en g.

$$\% Cl^- = 1,708 \frac{mg}{l} \times \frac{1g}{1000mg} \times \frac{0,250l}{2g} \times 100$$

$$Cl^- = 0,021 \%$$

Evaluación de la concentración de cloruros en la probeta de referencia a una profundidad de 6mm.

Tabla 56: Valores de las absorbancias de la muestra a una profundidad de 6mm.

	ABSORBANCIA		
	LECTURA 1	LECTURA 2	PROMEDIO
MUESTRA.	0,068	0,060	0,064

Fuente: (Propia).

Determinación de la concentración de cloruros en mg/l.

$$x = \frac{y - 0,0037}{0,0353}$$

$$x = \frac{0,064 - 0,0037}{0,0353}$$

$$x = 1,708mg/l$$

Determinación del porcentaje en peso cloruros en la muestra ($\% Cl^-$).

$$\%Cl^{-} = C \times \frac{V}{P} \times 100$$

$$\% Cl^{-} = 1,708 \frac{mg}{l} \times \frac{1g}{1000mg} \times \frac{0,250l}{2g} \times 100$$

$$Cl^{-} = 0,021 \%$$

Evaluación de la concentración de cloruros en la probeta de referencia a una profundidad de 9mm.

Tabla 57: Valores de las absorbancias de la muestra a una profundidad de 9mm.

	ABSORBANCIA		
	LECTURA 1	LECTURA 2	PROMEDIO
MUESTRA.	0,062	0,067	0,065

Fuente: (Propia).

Determinación de la concentración de cloruros en mg/l.

$$x = \frac{y - 0,0037}{0,0353}$$

$$x = \frac{0,065 - 0,0037}{0,0353}$$

$$x = 1,722mg/l$$

Determinación del porcentaje en peso cloruros en la muestra (% Cl⁻).

$$\%Cl^{-} = C \times \frac{V}{P} \times 100$$

$$\% Cl^{-} = 1,722 \frac{mg}{l} \times \frac{1g}{1000mg} \times \frac{0,250l}{2g} \times 100$$

$$Cl^{-} = 0,022\%$$

RESULTADOS DEL CONTENIDO DE IONES CLORUROS EN LAS PROBETAS EXPUESTAS A 30 DÍAS EN LA SOLUCIÓN CON pH 9.

Tabla 58: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 3mm.

	ABS.	CONC. (mg/l)	CONC. (g/l)	% Cl⁻
MUESTRA	0,085	2,232	0,002	0,028
DUPLICADO	0,080			
PROMEDIO	0,083			

Fuente: (Propia).

Tabla 59: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 6mm.

	ABS.	CONC. (mg/l)	CONC. (g/l)	% Cl⁻
MUESTRA	0,062	1,708	0,002	0,021
DUPLICADO	0,066			
PROMEDIO	0,064			

Fuente: (Propia).

Tabla 60: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 9mm.

	ABS.	CONC. (mg/l)	CONC. (g/l)	% Cl⁻
MUESTRA	0,060	1,652	0,002	0,021
DUPLICADO	0,064			
PROMEDIO	0,062			

Fuente: (Propia).

RESULTADOS DEL CONTENIDO DE IONES CLORUROS EN LAS PROBETAS EXPUESTAS A 60 DÍAS EN LA SOLUCIÓN CON pH 9.

Tabla 61: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 3mm.

	ABS.	CONC. (mg/l)	CONC. (g/l)	% Cl ⁻
MUESTRA	0,125	3,436	0,003	0,043
DUPLICADO	0,125			
PROMEDIO	0,125			

Fuente: (Propia).

Tabla 62: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 6mm.

	ABS.	CONC. (mg/l)	CONC. (g/l)	% Cl ⁻
MUESTRA	0,066	1,609	0,002	0,020
DUPLICADO	0,055			
PROMEDIO	0,061			

Fuente: (Propia).

Tabla 63: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 9mm.

	ABS.	CONC. (mg/l)	CONC. (g/l)	% Cl ⁻
MUESTRA	0,060	1,694	0,002	0,021
DUPLICADO	0,067			
PROMEDIO	0,064			

Fuente: (Propia).

RESULTADOS DEL CONTENIDO DE IONES CLORUROS EN LAS PROBETAS EXPUESTAS A 90 DÍAS EN LA SOLUCIÓN CON pH 9.

Tabla 64: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 3mm.

	ABS.	CONC. (mg/l)	CONC. (g/l)	% Cl ⁻
MUESTRA	0,180	4,994	0,005	0,062
DUPLICADO	0,180			
PROMEDIO	0,180			

Fuente: (Propia).

Tabla 65: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 6mm.

	ABS.	CONC. (mg/l)	CONC. (g/l)	% Cl⁻
MUESTRA	0,068	1,737	0,002	0,022
DUPLICADO	0,062			
PROMEDIO	0,065			

Fuente: (Propia).

Tabla 66: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 9mm.

	ABS.	CONC. (mg/l)	CONC. (g/l)	% Cl⁻
MUESTRA	0,064	1,652	0,002	0,021
DUPLICADO	0,060			
PROMEDIO	0,062			

Fuente: (Propia).

RESULTADOS DEL CONTENIDO DE IONES CLORUROS EN LAS PROBETAS EXPUESTAS A 30 DÍAS EN LA SOLUCIÓN CON pH 10.

Tabla 67: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 3mm.

	ABS.	CONC. (mg/l)	CONC. (g/l)	% Cl⁻
MUESTRA	0,095	2,422	0,002	0,030
DUPLICADO	0,085			
PROMEDIO	0,090			

Fuente: (Propia).

Tabla 68: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 6mm.

	ABS.	CONC. (mg/l)	CONC. (g/l)	% Cl⁻
MUESTRA	0,062	1,8090	0,0018	0,0226
DUPLICADO	0,066			
PROMEDIO	0,064			

Fuente: (Propia).

Tabla 69: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 9mm.

	ABS.	CONC. (mg/l)	CONC. (g/l)	% Cl⁻
MUESTRA	0,060	1,715	0,0017	0,0214
DUPLICADO	0,060			
PROMEDIO	0,060			

Fuente: (Propia).

RESULTADOS DEL CONTENIDO DE IONES CLORUROS EN LAS PROBETAS EXPUESTAS A 60 DÍAS EN LA SOLUCIÓN CON pH 10.

Tabla 70: de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 3mm.

	ABS.	CONC. (mg/l)	CONC. (g/l)	% Cl⁻
MUESTRA	0,133	3,377	0,00338	0,0422 2
DUPLICADO	0,128			
PROMEDIO	0,131			

Fuente: (Propia).

Tabla 71: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 6mm.

	ABS.	CONC. (mg/l)	CONC. (g/l)	% Cl⁻
MUESTRA	0,065	1,892	0,002	0,024
DUPLICADO	0,07			
PROMEDIO	0,068			

Fuente: (Propia).

Tabla 72: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 9mm.

	ABS.	CONC. (mg/l)	CONC. (g/l)	% Cl⁻
MUESTRA	0,062	1,715	0,002	0,021
DUPLICADO	0,058			
PROMEDIO	0,060			

Fuente: (Propia).

RESULTADOS DEL CONTENIDO DE IONES CLORUROS EN LAS PROBETAS EXPUESTAS A 90 DÍAS EN LA SOLUCIÓN CON pH 10.

Tabla 73: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 3mm.

	ABS.	CONC. (mg/l)	CONC. (g/l)	% Cl⁻
MUESTRA	0,196	4,851	0,005	0,061
DUPLICADO	0,190			
PROMEDIO	0,193			

Fuente: (Propia).

Tabla 74: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 6mm.

	ABS.	CONC. (mg/l)	CONC. (g/l)	% Cl⁻
MUESTRA	0,067	1,915	0,00192	0,0239
DUPLICADO	0,07			
PROMEDIO	0,069			

Fuente: (Propia).

Tabla 75: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 9mm.

	ABS.	CONC. (mg/l)	CONC. (g/l)	% Cl⁻
MUESTRA	0,062	1,691	0,002	0,0211
DUPLICADO	0,056			
PROMEDIO	0,059			

Fuente: (Propia).

RESULTADOS DEL CONTENIDO DE IONES CLORUROS EN LAS PROBETAS EXPUESTAS A 90 DÍAS EN LA SOLUCIÓN CON pH 13.

Tabla 76: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 3mm.

	ABS.	CONC. (mg/l)	CONC. (g/l)	% Cl⁻
MUESTRA	0,255	7,062	0,0070	0,0882
DUPLICADO	0,251			
PROMEDIO	0,253			

Fuente: (Propia).

Tabla 77: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 6mm.

	ABS.	CONC. (mg/l)	CONC. (g/l)	% Cl⁻
MUESTRA	0,064	1,793	0,0017	0,022
DUPLICADO	0,07			
PROMEDIO	0,067			

Fuente: (Propia).

Tabla 78: Valores de las absorbancias y la concentración de cloruros a una profundidad de 9mm.

	ABS.	CONC. (mg/l)	CONC. (g/l)	% Cl⁻
MUESTRA	0,055	1,5525	0,0015	0,0194
DUPLICADO	0,062			
PROMEDIO	0,058			

Fuente: (Propia).

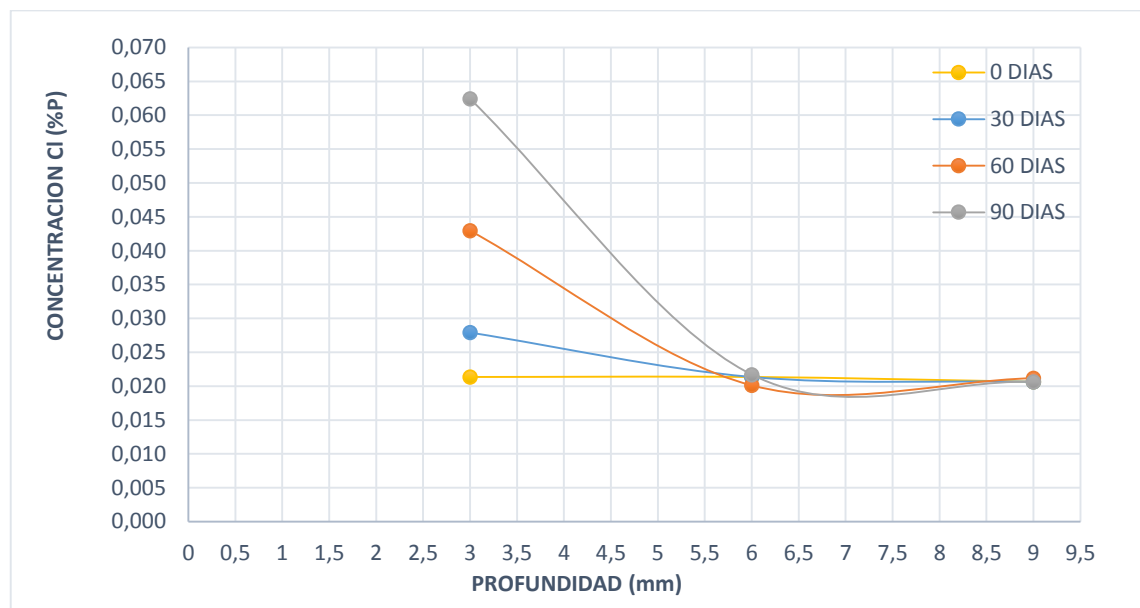
RESULTADOS DEL CONTENIDO DE IONES CLORUROS EN LAS PROBETAS EXPUESTAS EN LA SOLUCIÓN CON pH 9.

En las siguientes tablas se puede apreciar los resultados del porcentaje de cloruros obtenidos, en los tres casos de pH y a diferentes profundidades.

Tabla 79: Valores del porcentaje de cloruros en las probetas expuestas a agua con pH 9.

PROFUNDIDAD (mm)	% CLORUROS			
	0 DIAS	30 DIAS	60 DIAS	90 DIAS
3	0,021	0,028	0,043	0,062
6	0,021	0,021	0,020	0,022
9	0,021	0,021	0,021	0,021

Fuente: (Propia).



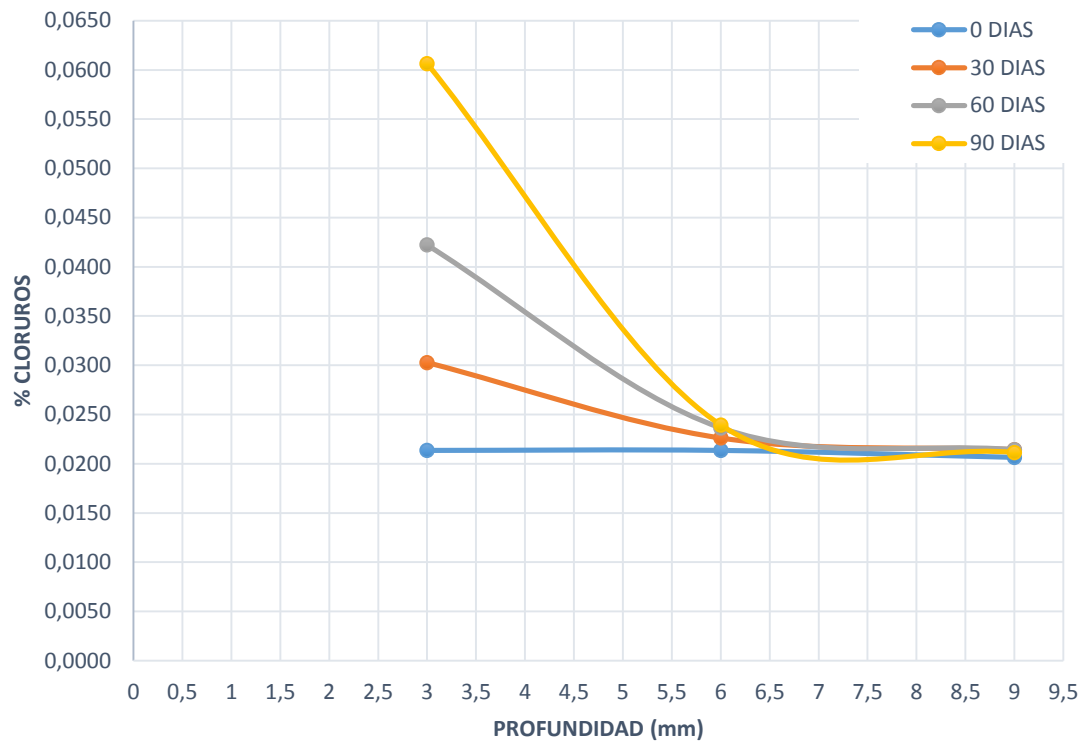
Grafica 13: Cambios en el contenido de cloruros a diferentes profundidades expuestas a una solución con pH 9. Fuente: (Propia).

RESULTADOS DEL CONTENIDO DE IONES CLORUROS EN LAS PROBETAS EXPUESTAS EN LA SOLUCIÓN CON pH 10.

Tabla 80: Valores del porcentaje de cloruros en las probetas expuestas a agua con pH 10.

PROFUNDIDAD (mm)	% CLORUROS			
	0 DIAS	30 DIAS	60 DIAS	90 DIAS
3	0,0214	0,030	0,042	0,061
6	0,0214	0,023	0,024	0,024
9	0,0206	0,021	0,021	0,021

Fuente: (Propia).



Grafica 14: Cambios en el contenido de cloruros a diferentes profundidades expuestas a una solución con pH 10. **Fuente:** (Propia).

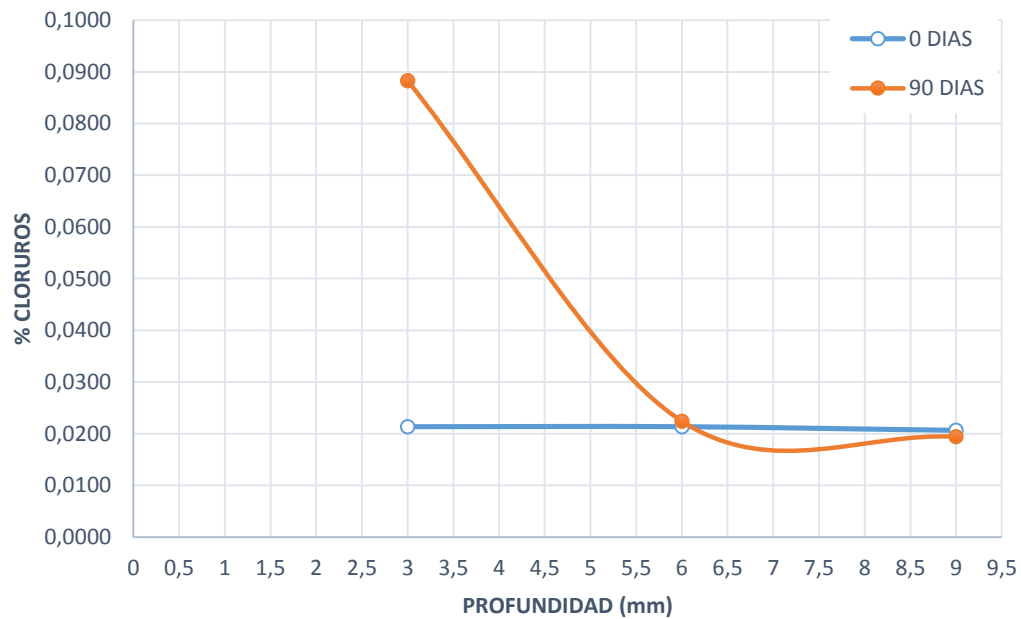
RESULTADOS DEL CONTENIDO DE IONES CLORUROS EN LAS PROBETAS EXPUESTAS EN LA SOLUCIÓN CON pH 13.

Tabla 81: Valores del porcentaje de cloruros en las probetas expuestas a agua con pH 13.

PROFUNDIDAD	% CLORUROS	
	0 DIAS	90 DIAS
3	0,0214	0,0882
6	0,0214	0,0224
9	0,0206	0,0194

Fuente: (Propia).

Los resultados obtenidos en los ensayos químicos se muestran en la ilustración., en la que se representa la concentración de cloruros totales (expresados en % P de cloruros) en función de la profundidad (en mm).



Grafica 15: Cambios en el contenido de cloruros a diferentes profundidades expuestas a una solución con pH 13. **Fuente:** (Propia).